Page Denied

Next 5 Page(s) In Document Denied

4.2 Meßmethoden zur Bestimmung der Kenngrößen von Si-Dioden im Mikrowellengebiet

Ing. *W. Otto*, Berlin-Köpenick

Während im Dezimeterwellengebiet noch Trioden und Hochvakuumdioden Anwendung finden können, scheiden auch diese Röhren im cm-Gebiet wegen ihres unvermeidlich großen Einflusses der Kapazitäten und der beträchtlichen Induktivitäten der Zuleitungen aus. Eine Kapazität von 10 pF stellt z. B. bei $\lambda = 3{,}2$ cm nur noch einen Blindwiderstand von 1,6 Ω dar. Eine Vergrößerung der Elektrodenabstände kommt wegen der Laufzeiteinflüsse nicht in Betracht. Außerdem stellen die durch Laufzeiteinflüsse veränderten Eingangswiderstände eine zusätzliche Rauschquelle dar. Weitaus günstiger liegen die Verhältnisse beim Halbleiter in Form des Spitzendetektors. Er hat sehr kleine Kapazitäten, die meist unter 1 pF liegen, und erlaubt durch seinen Aufbau und die Möglichkeit des direkten Einbaus in den Hohlleiter weitgehende Herabsetzung der Zuleitungsverluste. Auch rauschmäßig ist er als kalter Widerstand den Röhren mit Glühkatode in gewissen Grenzen überlegen. Bei zu großer Aussteuerung ergibt der Detektor allerdings Rauschströme, die diejenigen der Hochvakuumdioden um Zehnerpotenzen übertreffen können. Es ist daher darauf zu achten, daß die Oszillatoramplitude 0,5 V Spitzenspannung nicht übersteigt. Aus diesem Grunde liegt der günstigste Arbeitsbereich bei 0,3 bis 0,4 V Spitzenspannung, was für die Anwendung im Mischbetrieb als auch als Empfangsgleichrichter ausreicht.

Ein weiterer Vorteil des Detektors ist, daß sich Laufzeiteinflüsse erst im mm-Gebiet bemerkbar machen. Diese günstige Eigenschaft ist darauf zurückzuführen, daß die Ausdehnung der Schottkyschen Randschicht nur etwa 10^{-5} cm beträgt, daß also der Vorgang der Gleichrichtung in unmittelbarer Nähe der Spitze vor sich geht. Da die Frequenzbegrenzung eine Funktion der halbleitenden Substanz ist, ist die Gleichrichtung mit Germanium unter 10 cm Wellenlänge derjenigen mit Silizium unterlegen. Es werden daher im cm-Gebiet ausschließlich Si-Dioden verwendet.

Für die Verwendung als Mischorgan im cm-Gebiet werden an den Detektor folgende Anforderungen gestellt:

1. Die Anpassung des Detektors an den Wellenwiderstand der Hohlleitung muß bei der Betriebswelle der Magnetrons von 3,2 cm entsprechend der Frequenz $f = 9375$ MHz gewährleistet sein, da sonst die Leistungsübertragung infolge der Energiereflexion nicht optimal ist. Ein Koeffizient stehender Wellen *KSW*, auch Wellenverhältnis $\frac{1}{m}$ genannt, von 1,6 ergibt nach der Gleichung $\frac{N}{N_0} = \frac{4k}{(1+k)^2}\,100$ [%], wobei $k = KSW$, schon einen Leistungsverlust von 5 % bedeutet, d. h., nur 95 % der ankommenden Leistung werden vom Detektor aufgenommen, 5 % dagegen werden reflektiert und laufen zum Generator zurück.

2. Da die Frequenz des Magnetrons nicht konstant ist und verschiedene Magnetrons unterschiedliche Frequenzen haben, und weil Signal- und Oszillatorfrequenz einen Abstand von 60 MHz haben, muß der Detektor eine gewisse Breitbandigkeit aufweisen, d. h., Veränderungen der Betriebsfrequenz um ± 100 MHz dürfen keine wesentliche Verschlechterung der Anpassung des Detektors mit sich bringen.
3. Die Mischdämpfung darf nicht größer als 10 dB sein, da sonst ein zu großer Verlust der zur Verfügung stehenden HF-Leistung eintritt.
4. Das Detektorrauschen muß möglichst klein gehalten werden, um einen großen Signal-Rausch-Abstand zu gewährleisten.

Zur Kontrolle dieser genannten Forderungen wurden folgende Meßmethoden angewandt:

Für die Messungen wurden Si-Dioden Typ MD 13 vom „Carl-von-Ossietzky" Werk verwendet und zu Vergleichszwecken ausländische Detektoren der Typ 1 N 23 A und B. Später kam für die Untersuchungen noch eine Neuentwicklung des „Carl-von-Ossietzky"-Werkes, eine Si-Diode ähnlich der Type 1 N 23, hinzu.

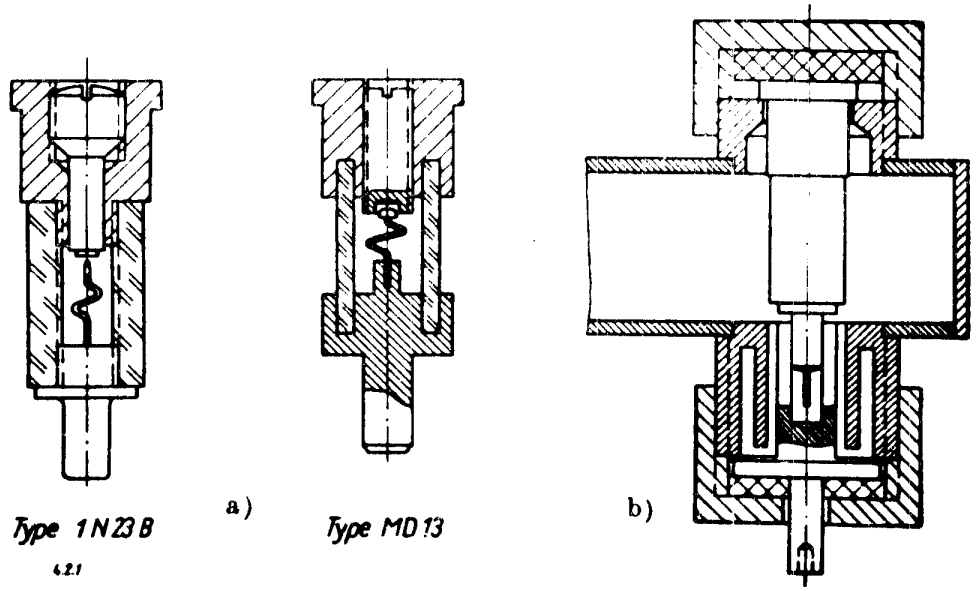


Bild 1

a) Detektoraufbau, b) Detektorkopf

Alle verwendeten Detektortypen werden wie eine Patrone in den [illegible] eingesetzt, der dann bereits abgestimmt ist. Zur Aufnahme des Detektors [illegible] leiter dient ein Detektorkopf, der für die verwendeten Typen entsprechend [illegible] aufgebaut ist. Die Kontaktgabe im unteren Teil erfolgt durch eine [illegible] in die das Detektorunterteil eingeführt wird. Im oberen Teil des Detektorkopfes [illegible] Kontaktgabe nach dem Einführen des Detektors durch eine [illegible] Um Störungen der Homogenität des Hohlleiters durch [illegible] ausgeführte Hülse zu vermeiden, wird mit Hilfe einer λ/2 Drossel [illegible] Kurzschluß in die Ebene der Hohlleiterinnenwand transformiert. Für [illegible] Messungen an Si-Dioden ist die Länge dieser Drosselfalle von erheblicher [illegible]

Einfluß. Schon Längenunterschiede von wenigen Zehnteln Millimeter wirken sich in merklichen Unterschieden der gemessenen Detektorimpedanz aus, während sich bei größeren Differenzen der Drosselfallenlänge die Unterschiede der gemessenen Impedanzen nicht mehr wesentlich vergrößern.

Für den praktischen Betrieb wird der Hohlleiter hinter dem Detektor durch einen festen Kurzschluß in etwa $\lambda_l/4$ Abstand von der Mittelachse des Detektors

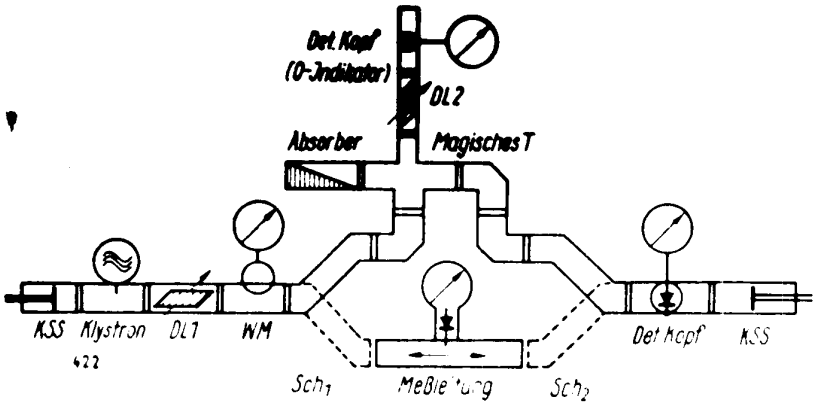


Bild 2. Meßanordnung für Anpassungsmessungen

abgeschlossen. Um jedoch die Möglichkeit zu haben, die optimale Anpassung und die Breitbandigkeit des Detektors zu messen sowie dessen Impedanz zu bestimmen, wurde dieser Kurzschluß für diesen Meßplatz durch einen veränderlichen Kurzschlußschieber ersetzt.

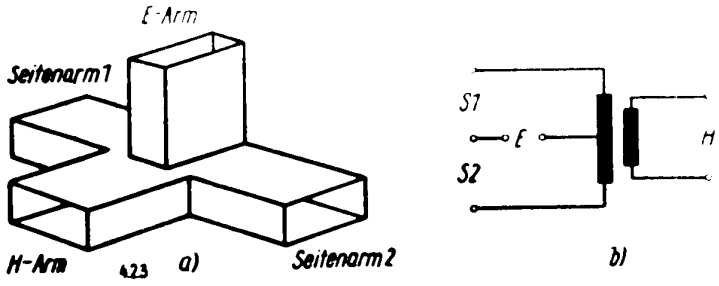


Bild 3. Magisches T

a) Aufbau, b) Ersatzschema

Zunächst wurden für die verschiedenen Detektortypen Messungen der Anpassung und der Breitbandigkeit durchgeführt. Dafür wurde eine Meßanordnung entsprechend Bild 2 gewählt.

Durch die beiden Umschalter $Sch_{1,2}$ ist es möglich, die Energie des Klystrons wahlweise über das „Magische T" bzw. über die Meßleitung auf den Detektor zu leiten. Das „Magische T" ist in Bild 3 dargestellt. Es entspricht einer Brückenschaltung, d.h., ist bei Einspeisung durch den H-Arm das Wellenverhältnis in den beiden Seitenarmen gleich, so wird die Energie im E-Arm gleich Null, ent-

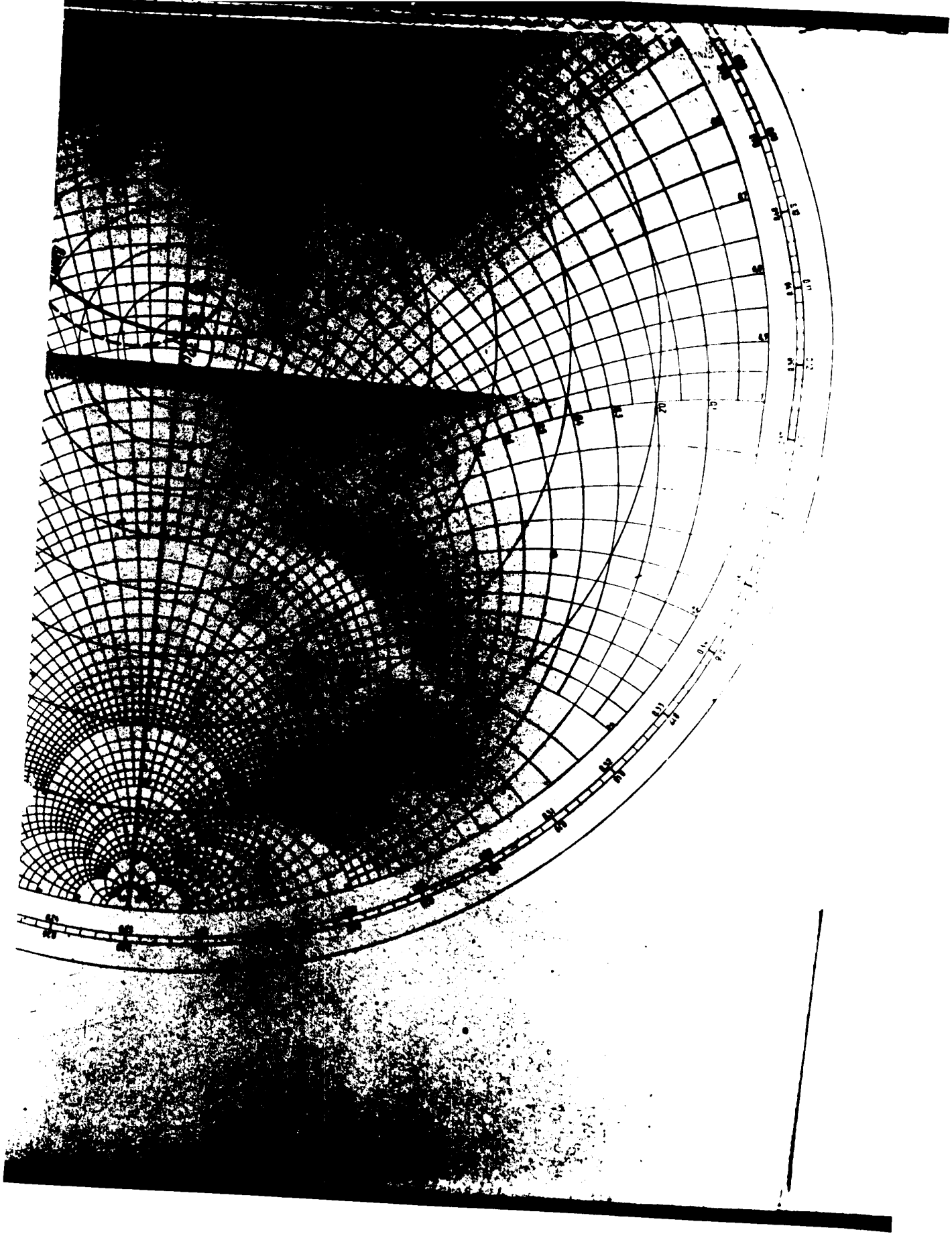
[illegible] Wellenwiderstand [illegible] Verstärkerwiderstand, z. B. den an der anderen Seite [illegible] Detektor mit Kurzschlußschieber [illegible] das Anzeigeinstrument im E-Arm einen Ausschlag, der bei kleinen Fehlanpassungen etwa proportional dem KSW ist. Bei guter Anpassung der Si-Diode, also wenn der Koeffizient stehender Wellen nahezu eins wird, geht der Strom im E-Arm fast bis auf Null zurück. Auf Grund dieser Tatsache ist es möglich, die optimale Anpassung des Detektors durch Verändern des Kurzschlußschieberabstandes einzustellen. Bedingung dafür ist allerdings, daß der Detektor ZF-seitig angepaßt ist ($R_a = R_i$). Danach ist dann durch Umschalten auf die Meßleitung eine Absolutmessung des Wellenverhältnisses, d. h. der Anpassung des Detektors, möglich. Bei der Durchführung dieser Messungen ergaben sich für die Detektoren der Typen 1 N 23 A und B Kurzschlußschieberstellungen für optimale Anpassung, die sich um $\pm$ 5 mm von einem mittleren Wert von $\lambda_i/4$ unterscheiden, für die Detektoren der Type MO 13 sogar Abweichungen von etwa $\pm$ 11 mm, also Abweichungen von der Größe des mittleren Wertes selbst. Auf die Ursachen dieser Abweichungen einzelner Detektoren und deren Beseitigung kann jedoch erst später nach der Besprechung der Messung der Breitbandigkeit eingegangen werden.

Zur Bestimmung der Breitbandigkeit eines Detektors ist es nötig, seine Impedanz in Abhängigkeit von der Frequenz zu messen. Nun ist dieses Verfahren aber sehr langwierig und umständlich, da für jeden Meßpunkt die Frequenz des Klystrons durch mechanisches Verstimmen des Klystrons und durch Nachregeln der Reflexionsspannung neu eingestellt werden muß. Ein Weg zur Vereinfachung der Messung ergibt sich, wenn man auf das Prinzip eines Mittelwertmessers zurückgeht, dessen Bandbreite nicht durch Verändern der Frequenz, sondern durch entsprechende Verstimmung der Kapazität oder Induktivität bei konstanter Frequenz gemessen wird. Das gleiche Verfahren läßt sich auch für die Messung der Breitbandigkeit des Detektors anwenden. Dazu faßt man den Detektor entsprechend einem Ersatzschaltbild für das Hyperfrequenzgebiet [illegible] Reihenschwingkreis auf. Dieser wird durch den in die Detektorleitung [illegible] Blindwiderstand, dargestellt durch die kurzgeschlossene Leitungsstrecke [illegible] Detektor, verstimmt. Eine Messung der Impedanz des Detektors in Abhängigkeit von der Kurzschlußschieberstellung ergibt auch tatsächlich, wie [illegible] dargestellt, eine kreisförmige Kurve im Smithschen Polardiagramm, die [illegible] jeweils $\lambda_i/2$ Kurzschlußschieberänderung infolge der Transformation der Blindwiderstände im Abstand von $\lambda_i/2$ wiederholt.

Mißt man dagegen die Impedanz des Detektors als Funktion der Frequenz, so ergeben sich im Polardiagramm schleifenförmige Kurven. Das Entstehen dieser Kurvenform kann man sich leicht aus dem Ersatzschaltbild des Detektors anschaulichen, indem man den Detektor als Reihenschwingkreis mit parallelgeschalteter Kapazität auffaßt und beide Leitwertdiagramme getrennt in der komplexen Zahlenebene aufträgt. Durch Superponieren und Übertragen in das Polardiagramm erhält man dann eine der gemessenen Kurve ähnliche Schleife. In Bild 5 ist die zeichnerische Konstruktion dieser Impedanzkurve an Hand eines vereinfachten Detektorersatzschaltbildes durchgeführt worden.

Wie aus Bild 4 hervorgeht, ähnelt in einem gewissen Frequenzbereich diese schleifenförmige Impedanzkurve, die als Funktion der Frequenz gemessen wird,

Bild 1. Impedanz eines Doktors als Funktion der Kurzschlußschleifenstellung und der Wellenlänge bei konst. Kopplung



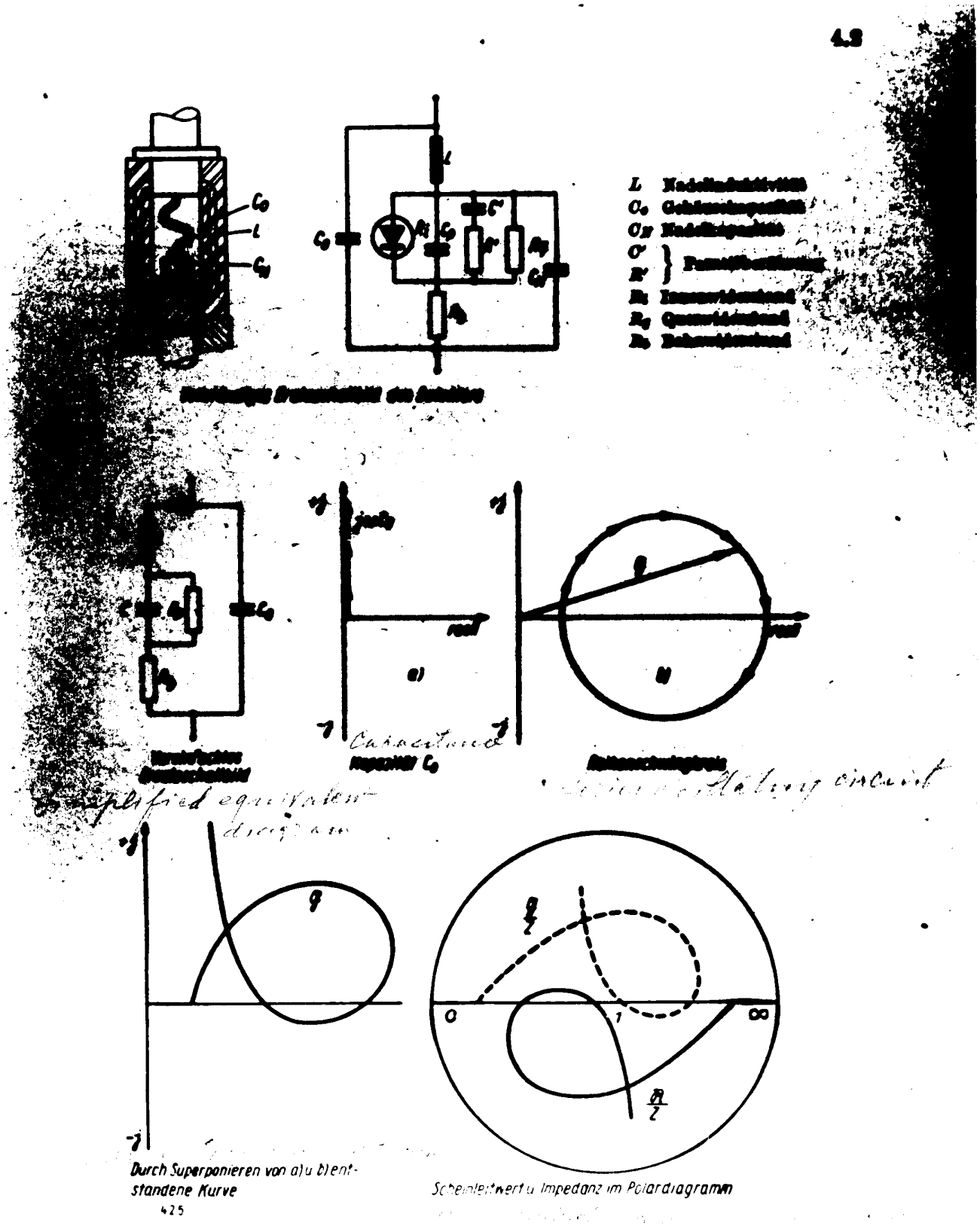


Bild 5. Konstruktion der Impedanzkurve

dem Kreis, der durch Messung der Impedanz in Abhängigkeit von der Kurzschlußschieberstellung aufgenommen wurde. Trägt man nun in diesem Bereich, der eine Breite von etwa 800 MHz hat, die entsprechenden Wellenverhältnisse $KSW = f(KSS)$ und $KSW = f(\lambda)$ auf, so zeigt sich, wie aus Bild 6 ersichtlich, eine gute Übereinstimmung der Anpassungskurven dieser beiden Messungen. Es ergibt sich innerhalb dieses Bereiches eine recht gute Linearität der Abhängigkeit von der Frequenzänderung und der Kurzschlußverschiebung, und zwar entspricht einer Kurzschlußverschiebung von + 1 mm eine Frequenzänderung um — 55 MHz bei f_0 = 9375 MHz. Dadurch ist man nicht nur in der Lage, die Messung der Breitbandigkeit auf die recht einfache Messung der Anpassung in Abhängigkeit von

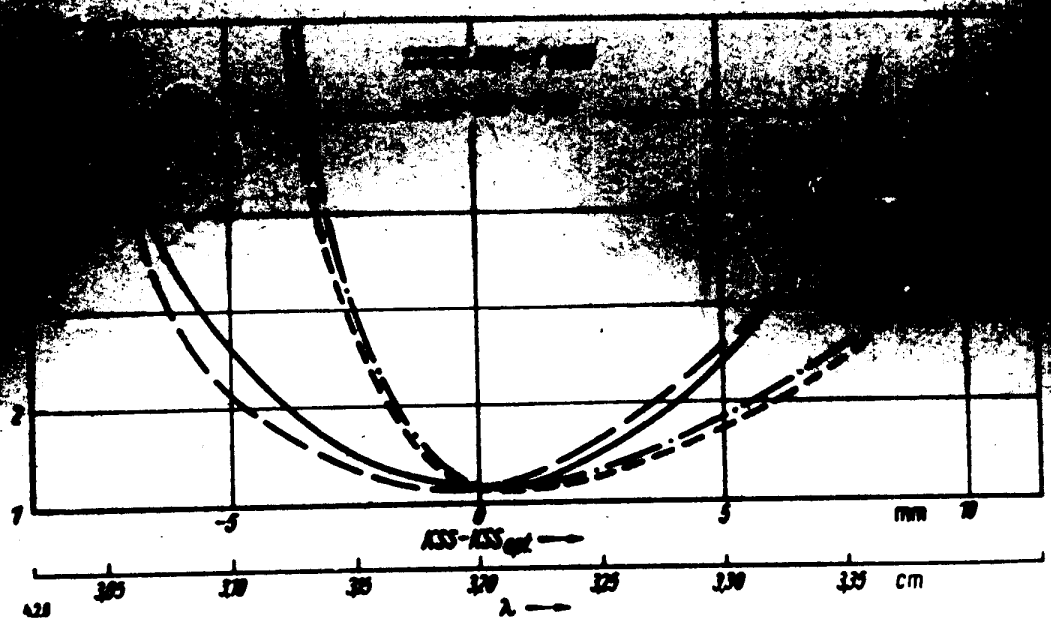


Bild 6. KSW als Funktion der Kurzschlußschieberstellung KSS und der Wellenlänge λ

Kurzschlußschieberstellung ohne Veränderung der Klystronfrequenz durchzuführen, sondern man kann darüber hinaus auf Grund des obengenannten Umrechnungsverhältnisses sogar quantitative Aussagen über die Breitbandigkeit des Detektors machen. Wegen der großen Einfachheit wurden nach gründlicher Prüfung alle weiteren Messungen der Breitbandigkeit von Detektoren nach dieser Methode durchgeführt. Dabei ist zu beachten, daß das Umrechnungsverhältnis der Kurzschlußänderung in Frequenzänderung jeweils nur für einen Detektor, und zwar [illegible] folgen- [illegible] gleichen Fre- [illegible] lässig, da die Ku- [illegible] Detektoren gleich sind. [illegible] Detektoren müßten die [illegible] optimaler Anpassung [illegible] werden.

Die Breitbandigkeit verschiedener Detektoren der Typen 1 N 23 A und B wurde gemessen. Dabei ergaben sich im wesentlichen drei Gruppen von Detektoren, deren Anpassungs- und Impedanzverlauf in Bild 7 und 8 dargestellt ist.

1. Detektoren mit optimaler Anpassung beim Kurzschlußschieberabstand von 10 mm, d. h. ungefähr $\lambda_i/4$, haben eine Anpassungskurve, die einer sehr breiten Resonanzkurve entspricht und die symmetrisch zum Punkte optimaler Anpassung liegt. Eine Veränderung des Kurzschlußschiebers um $\pm$ 3 mm vergrößert den *KSW'* von 1,25 auf 1,6. Das entspricht einer Frequenzänderung um etwa $\pm$ 150 MHz. Mißt man die auf den Kurzschlußschieber bezogene Impedanz dieser Detektoren in Abhängigkeit vom Richtstrom, so zeigen diese Kurven ein rein ohmsches Verhalten, d. h., die Impedanz dieser Detektoren verläuft auf der reellen Achse.

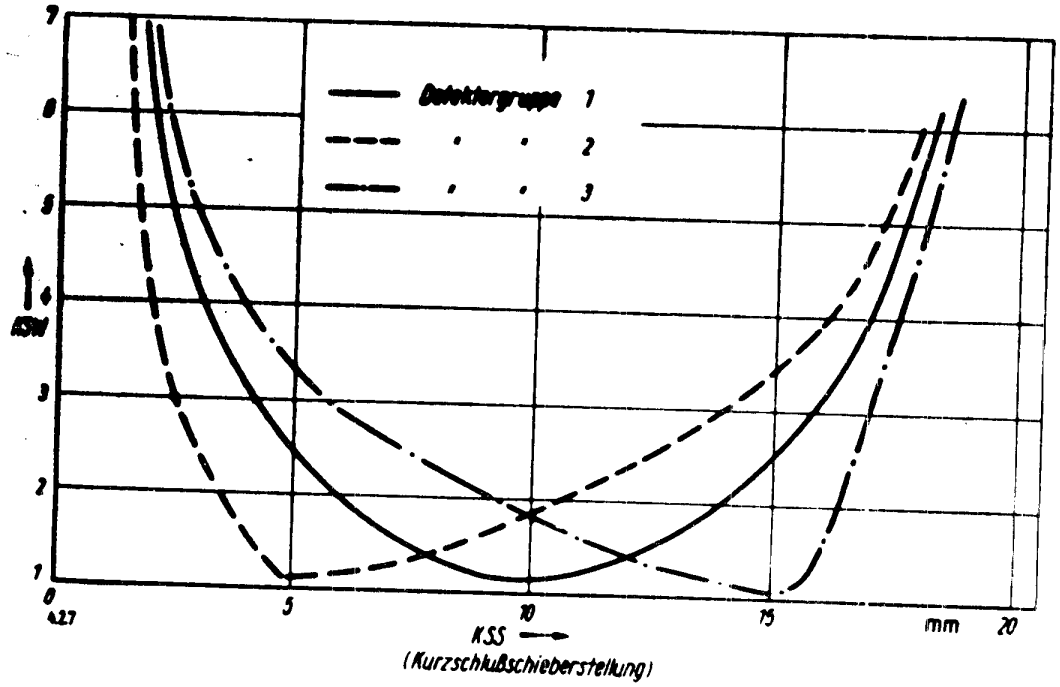


Bild 7. Anpassungskurven der drei Detektorgruppen

2. Zur zweiten Gruppe gehören Detektoren mit optimaler Anpassung bei einem Kurzschlußschieberabstand von etwa 5 mm. Die Kurven des *KSW* in Abhängigkeit von der Kurzschlußschieberstellung steigen nach kürzeren Kurzschlußabständen hin steil, nach größeren Kurzschlußabständen hin flach an, so daß bei -1 und $+4$ mm Kurzschlußschieberänderung der Wert von *KSW* = 1,6 erreicht wird. Das entspricht also einer Frequenzänderung von -55 nach -220 MHz. Mißt man auch hier wieder die auf den Kurzschlußschieber bezogene Impedanz der Detektoren als Funktion des Richtstromes, so zeigen die Kurven eine mit größer werdendem Detektorstrom zunehmende induktive Verstimmung. Die Detektoren dieser Gruppe haben also einen induktiven Scheinwiderstand, [illegible] Detektoren transformierten

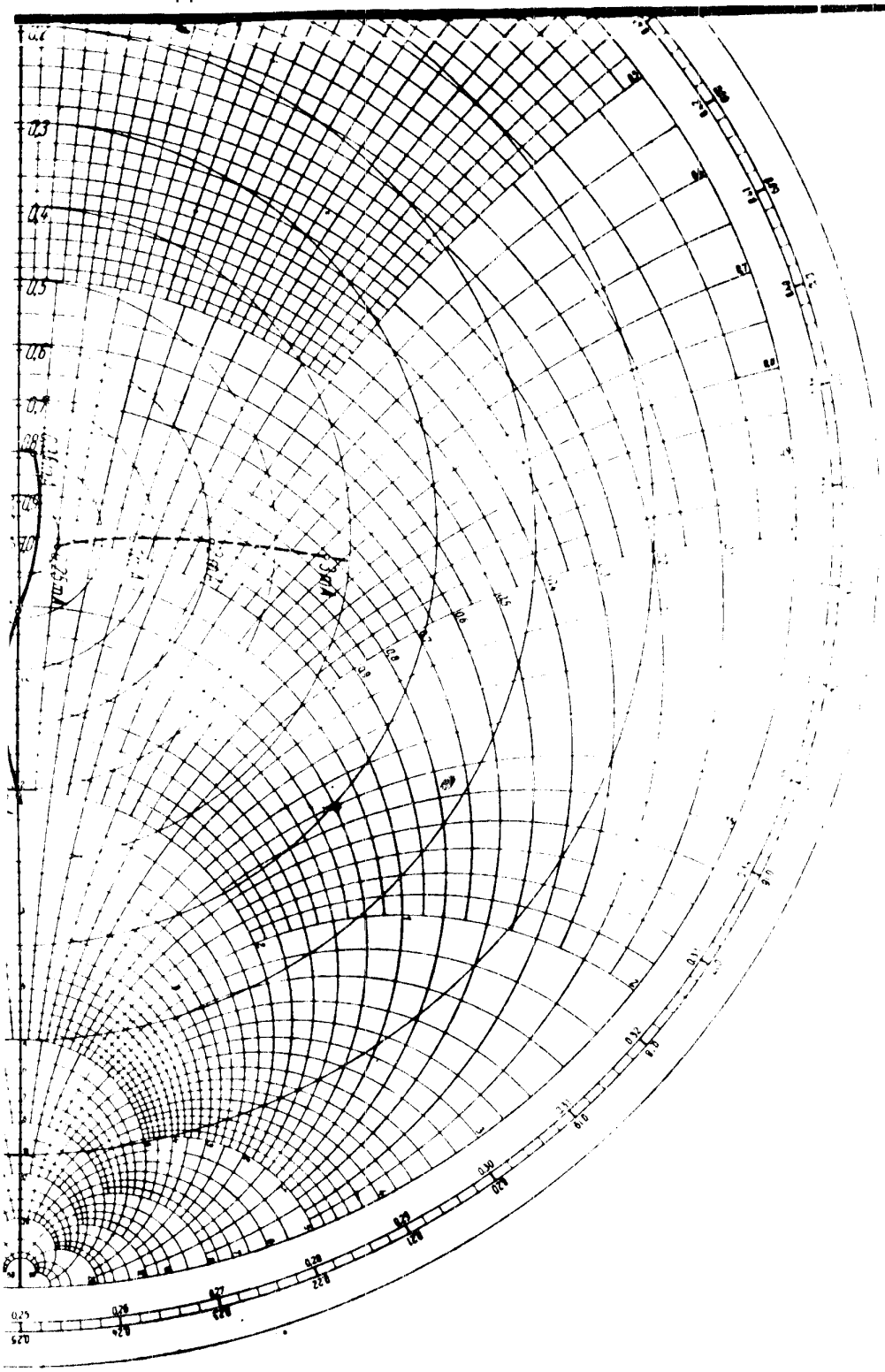
kapazitiven Blindwiderstand der kurzgeschlossenen Leitung der Länge $< \lambda_t/4$ weggestimmt werden kann, so daß sich optimale Anpassung für Kurzschlußabstände $< \lambda_t/4$ ergibt.

3. Die dritte Gruppe umfaßt alle Detektoren, deren Kurzschlußabstand für optimale Anpassung bei etwa 15 mm liegt. Die Kurven $KSW = f(KSS)$ steigen nach größeren Kurzschlußschieberwerten hin steil, nach kleineren Werten hin flach an, sie sind also praktisch die Spiegelung der Kurven der Detektorgruppe 2 an der Geraden, parallel zur Ordinate durch den Punkt der Kurzschlußschieberstellung 10 mm. Entsprechend dieser Kurvenform zeigt auch die auf den Kurzschlußschieber bezogene Impedanz als Funktion des Richtstroms eine mit größer werdendem Richtstrom größer werdende kapazitive Verstimmung. Diese wird für optimale Anpassung bei kleinem Strom durch den in Detektorebene transformierten induktiven Blindwiderstand der kurzgeschlossenen Leitung der Länge $> \lambda_t/4$ weggestimmt.

Während die Si-Dioden der Typen 1 N 23 A und B trotz [illegible] hohen Impedanz alle eine recht gute Breitbandigkeit [illegible] zeigt der Type MD 13 fast ausschließlich ein sehr selektives [illegible] 1. Kurve in Bild 9 hervorgeht, die im gleichen Maßstab [illegible] dargestellt ist. Eine Verstimmung von ± [illegible] [illegible] KSW auf den doppelten Wert. Die [illegible] von 21 mm [illegible] [illegible] groß. Eine [illegible] wesentliche Verstimmung [illegible] bei dem Detektoren Typ MD 13 stellt die [illegible] von etwa $\lambda_t/2$ Länge [illegible] zur Detektorimpedanz dar. Eine [illegible] bewirkt daher schon eine erhebliche [illegible] d. h., der Detektor ist selektiv. Als Ursache dieser [illegible] Detektoren wurde zunächst die große Kapazität der auf den [illegible] Metallkappen angesehen. Ein Abdrehen dieser Kappen und [illegible] Annäherung der Detektorform an die vom Typ 1 N 23 [illegible] Verbesserung der Anpassung einzelner Detektoren, ohne jedoch die [illegible] der Detektoren zu beseitigen.

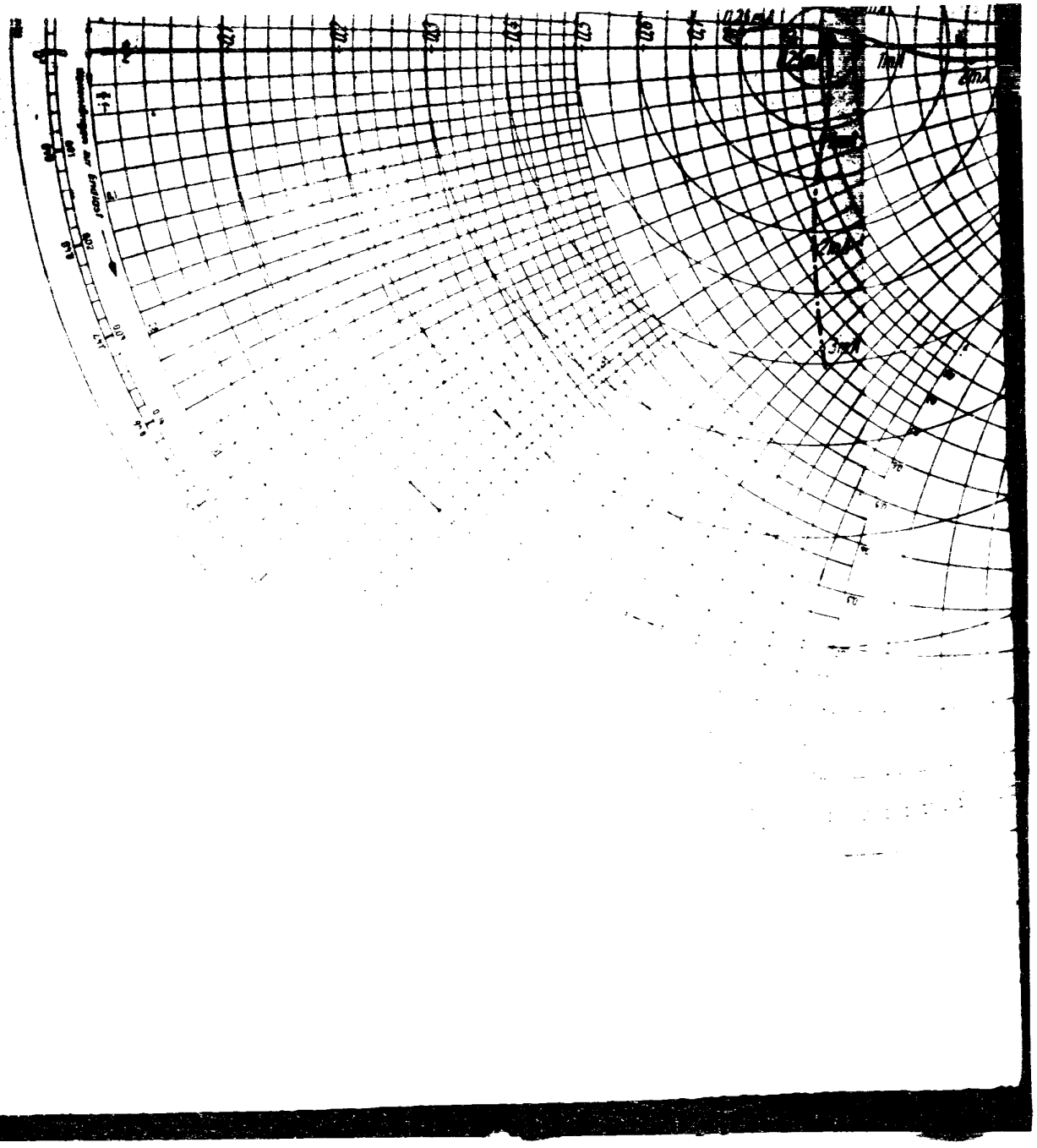
Mikroskopische Untersuchungen des Innenaufbaues der Detektoren [illegible] erhebliche Unterschiede der Typen 1 N 23 und MD 13, die in Bild 10 [illegible] dargestellt sind. Während in den ausländischen Typen z. B. geschliffene, [illegible] und geätzte Kristallquader, die auf einen Träger planparallel aufgelötet sind

Bild 5. Impedanz als Funktion des Frequenzmaßstabes für Doppelstromgruppen



male Anpassung
iter angepaßt ist
urzschlußschieber
einen Kurzschluß
der transformierte
is zur Detektor-
erstandes bewirkt
cr ist breitbandig.
ndwiderstand der
lindwiderstand im
rung dieses Blind-
ng des Detektors,
gon Impedanz der
en Keramikkörper
pen und damit eine
3 ergab auch eine
ch die Selektivität

ktoren zeigten nun
Bild 10 im Prinzip
geschliffene, polierte
aufgedampft sind, ver-

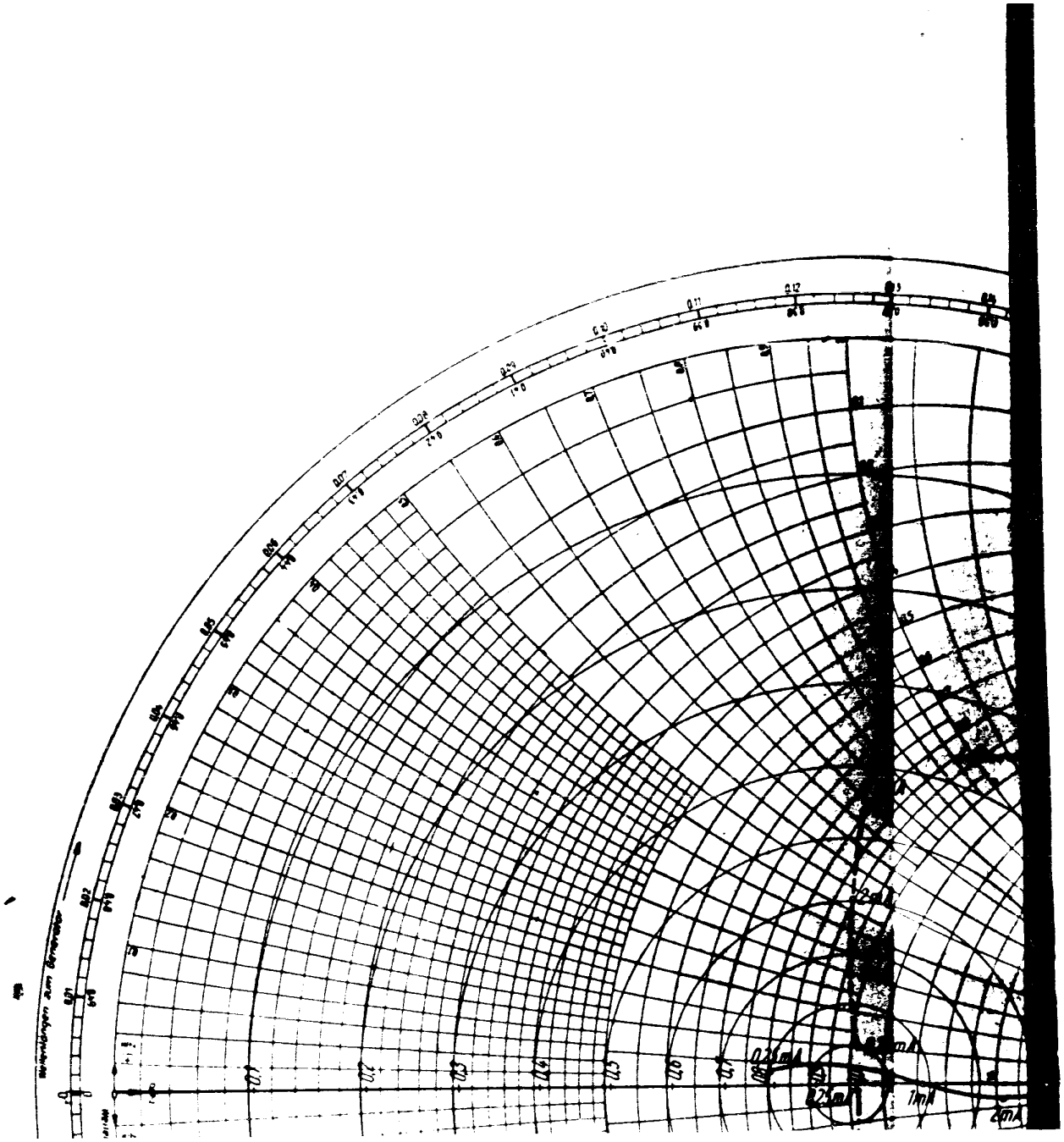


nge $< \lambda_1$ 4
urzschluß-

bstand für
S S) steigen
en Werten
r Detektor-
der Kurz-
gt auch ihre
ichtstromes
ve Verstim-
h den in die
urzgeschlos-

unterschied-
n die Detek-
, wie aus der
ren in Bild 7
Verschlech-
rgab sich bei
durchschnitt-
hon eine sehr

passung



wendet werden, sind beim Typ MD 13 rohe Kristallbruchstücke in die Fassung eingelötet. Auch die Nadel und deren Spitzenform zeigt wesentliche Unterschiede Da die polierte Kristalloberfläche vom Typ 1 N 23 ein praktisch homogenes Gefüge besitzt, ist nach dem Berühren von Nadel und Kristall die Veränderung der Impedanz des Detektors im wesentlichen nur noch abhängig vom Kontaktdruck.

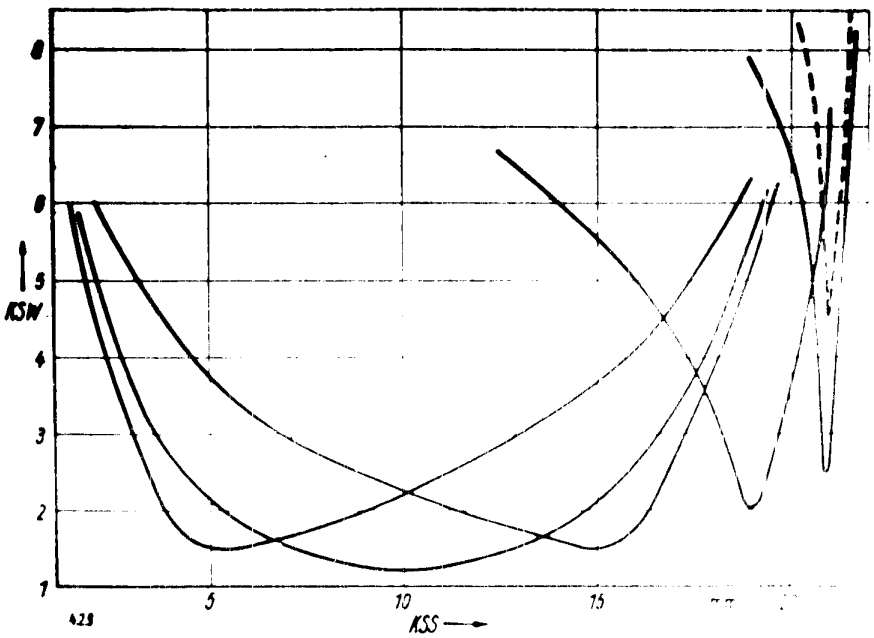


Bild 9. Anpassungskurven eines Detektors MD 13

------- Detektor unverändert, ———— Detektorkappen abgedreht [illegible] verschiedenen Kurzschlußabständen auf optimale Anpassung eingestellt

Bild 10. Kristall und Nadelspitze

a) Typ 1 N 23A, b) Typ MD 13

Anders liegen die Verhältnisse jedoch beim Typ MD 13, auf dessen gebirgiger Kristalloberfläche die Nadel erst einen Punkt großer Empfindlichkeit finden muß. Bei Erhöhung des Kontaktdruckes kann die Spitze von diesem Punkt wieder abrutschen und evtl. einen Punkt der Elektronenleitung berühren, während vorher Defektelektronenleitung vorlag. Dadurch kann sich die Kennlinie plötzlich umkehren. Ja, es können [illegible] Punkte gleichzeitig durch die Spitze berührt werden [illegible] Defektelektronenleitung und

bei Hochfrequenz Elektronenleitung eintritt, wo sich also die Kennlinie bei HF umkehrt. Auf Grund dieser Tatsache ist die optimale Einstellung des Detektors ungleich schwieriger als beim Typ 1 N 23. Die bisherige Einstellung der Detektoren erfolgte auf optimalen Strom bzw. auf die günstigste Kennlinie bei Niederfrequenz. Da die Impedanz der Si-Diode im wesentlichen durch den Kontaktdruck Spitze-Kristall infolge Änderung der Kapazitäts- und Widerstandswerte der Randschicht beeinflußt wird, wurde ein abgeänderter Detektor vom Typ MD 13 bei einem Kurzschlußschieberabstand von 10 mm auf optimale Anpassung bei HF durch Veränderung des Kontaktdruckes, also durch Veränderung seiner Impedanz eingestellt. Die gemessene Anpassungskurve $KSW = f(KSS)$, dargestellt in Bild 9, entsprach im wesentlichen in bezug auf Breitbandigkeit und Anpassung der Kurve der Detektorgruppe 1 vom Typ 1 N 23 A bzw. B. Der Richtstrom und die NF-Kennlinie zeigten kaum Unterschiede zwischen den vorherigen Werten bei optimaler Einstellung bei NF, da ja die geringfügigen Impedanzunterschiede bei NF praktisch keinen Einfluß haben.

Durch Einstellung des gleichen Detektors auf optimale Anpassung bei Kurzschlußabständen von 5 bzw. 15 mm durch geringfügige Änderung des Kontaktdruckes, d. h. durch Änderung der Detektorimpedanz, ließen sich mit dem gleichen Detektor auch die Kurven $KSW = f(KSS)$ der Detektorgruppen 2 und 3 sowie alle Zwischenwerte erreichen, wie ebenfalls in Bild 9 angedeutet. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt, daß eine optimale Einstellung der Detektoren bei Niederfrequenz nicht mit einer solchen bei Hochfrequenz identisch zu sein braucht, da die Impedanz des Detektors, die bei NF praktisch nicht in Erscheinung tritt, erst im Hyperfrequenzgebiet volle Wirksamkeit erhält und dann wesentlich die Anpassung und Breitbandigkeit des Detektors beeinflußt. Durch nachträgliches Abdrehen der Detektorfassungen, Entfernung des Farbanstriches sowie durch Einstellen der Detektoren auf optimale Anpassung bei HF bei einem Kurzschlußabstand von 10 mm konnten mit den Detektoren vom Typ MD 13 ähnlich gute Werte in bezug auf Anpassung und Breitbandigkeit erzielt werden wie mit dem Typ 1 N 23 A.

Eine weitere wichtige Kenngröße der Si-Diode für die Anwendung als Mischorgan im cm-Gebiet ist der Mischwirkungsgrad oder die Konversionsverluste oder Mischdämpfung. Der Mischwirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis der ZF-Ausgangsleistung zur HF-Eingangsleistung, wobei für Anpassung des Detektors $R_i = R_a$ nur die halbe Spannung der HF-EMK am Detektor anliegt, so daß der optimale Mischwirkungsgrad nicht größer als 0,25 bzw. die Mischdämpfung als Kehrwert davon nicht kleiner als 6 dB werden kann. Zur Messung der Mischdämpfung im cm-Gebiet wird die HF-Spannung amplitudenmoduliert. Die HF-Leistung N_0 und der Spannungsmodulationsgrad m werden gemessen und ergeben die HF-Eingangsleistung $N_e = N_0 \cdot m^2$. Die ZF-Ausgangsleistung wird an einem angepaßten Schwingkreis, dessen Resonanzwiderstand bekannt ist, durch Spannungsmessung als $N_a = \frac{U^2}{R_{res}}$ bestimmt. Die Mischdämpfung ergibt sich dann zu

$$L = \frac{N_e}{N_a} = \frac{N_0 \cdot m^2 \cdot R}{U^2} \quad [1].$$

Aus Gründen der Einfachheit wurde entsprechend dem Bisch[illegible] bisher mit 50 Hz Netzfrequenz moduliert, und zwar w[illegible] Berücksichtigung der Klystronen gegeben. Legt man den [illegible]

die steile Flanke des Schwingbereiches, so erhält man eine **Leistungsmodulation** des Klystrons, die etwa proportional der angelegten **Reflektorwechselspannung** ist. Außer der Amplitudenmodulation tritt jedoch auch noch eine **Frequenz- und** Phasenmodulation auf, die, wenn sie auch klein ist, das **Meßergebnis verfälschen** kann. Um nun diese [illegible] auszuschalten und eine reine Amplitude[illegible] periodisch ver-

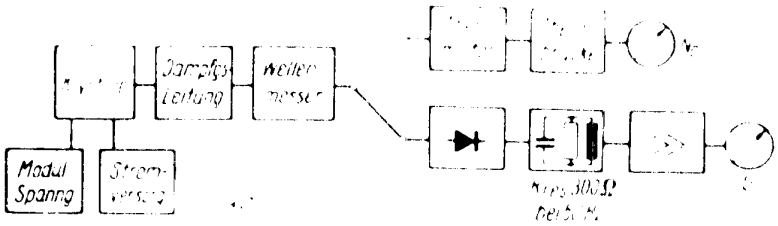


Bild 11. Messanordnung zur Messung [illegible] des Klystrons

anderlichen Attenuators, auch mechanischer Modulator genannt, [illegible] wie er auf Bild 12 dargestellt ist. Dieser besteht aus einem Motor mit etwa 3000 U/min, auf dessen Achse eine kreisförmige Isolierstoffscheibe exzentrisch befestigt ist. Die Scheibe hat eine im Vakuum gleichmäßig aufgedampfte Platinwiderstandsschicht auf der Oberfläche. Die Scheibe taucht durch einen Schlitz in den [illegible]

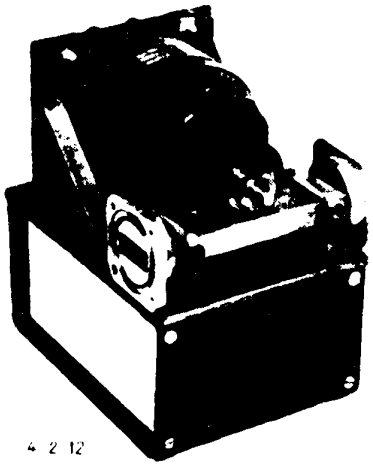


Bild 12. Mechanischer Modulator

weniger tief in den Hohlleiter ein und bewirkt damit eine nahezu sinusförmige Amplitudenmodulation. Zur kontinuierlichen Regelung des Modulationsgrades ist der Absatz der Scheibenhalterung, auf den die Dämpfungsscheibe aufgeschoben wird, im gleichen Maße exzentrisch zur Motorachse, wie die Bohrung in der Scheibe selbst. Dadurch ist es möglich, durch Drehen der Scheibe auf der Halterung beliebige Modulationsgrade (von 0% an zentrisches Laufen der Scheibe) einzustellen. Die Scheibe muß so tief in den Hohlleiter eintauchen, daß sie in ihrem Hochststand

noch etwa 2 mm in den Hohlleiter hineinragt, da sonst keine sinusförmige Modulation möglich ist, und damit der Oberwellenanteil steigt, sie soll jedoch auch nicht zu tief eintauchen, um die Anpassung des Leitungszuges möglichst wenig zu stören. Für einen Modulationsgrad $m = 10\,\%$ ist bei der hier gewählten Anordnung eine Scheibenexzentrizität von etwa 2 mm erforderlich. Die Anpassung des mechanischen Modulators liegt dabei in der Größenordnung von 1,2 bis 1,4 abhängig von der Scheibenstellung. Auch wenn die Leistungsmodulationskurve des Modulators einen symmetrischen, rein sinusförmigen Verlauf hat, ergeben sich Oberwellen, da für deren Entstehen die Spannungsmodulationskurve maßgebend ist, und sie ergibt sich aus den Quadratwurzelwerten der Leistungsmodulationskurve. Infolge dieses wenn auch geringen Oberwellenanteiles wird zur Messung der ZF-Ausgangsleistung ein Filter benötigt, das nur die Grundwelle durchläßt. Weiterhin ist die optimale Anpassung des Außenwiderstandes an den Detektor einen Widerstand von 300 Ω bei einem möglichst kleinen Gleichstromwiderstand, Bedingung, die ebenfalls durch einen Schwingkreis mit einem Resonanzw

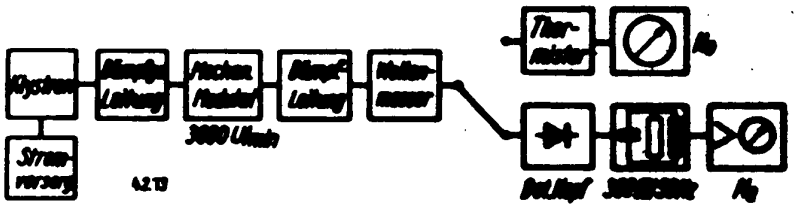


Bild 13. Blockschaltbild zur Messung der Mischdämpfung mit mechanischem Modulator

von 300 Ω erfüllt werden kann. Aus Gründen der Einfachheit wurde daher zur Aussiebung der ZF-Grundfrequenz und zur Erfüllung der Anpassungsbedingung ein schon vorhandener 50- Hz/300-Ω-Schwingkreis verwendet. Dadurch ergibt sich der Nachteil, daß die Motordrehzahl des mechanischen Modulators auf 3000 U/min konstant gehalten werden muß. Diese Voraussetzung ist jedoch sehr einfach dadurch zu erfüllen, daß bei Konstanthaltung aller anderen Veränderlichen die Motordrehzahl so lange geändert wird, bis sich maximaler Ausschlag am Anzeigeinstrument des Schwingkreises ergibt.

Die Spannung am Schwingkreis wurde durch einen in Neper geeichten Pegelmesser gemessen. Auf Grund der Definition des Spannungspegels 0 = 0,775 V entsprechend 1 mW an 600 Ω läßt sich leicht eine Umrechnungskurve für $N_{a(300)} = f(\mathrm{p\,Neper})$ berechnen, so daß man aus dieser Kurve direkt die ZF-Ausgangsleistung am 300-Ω-Schwingkreis für jeden gemessenen Pegelwert entnehmen kann.

Die Messung der HF-Leistung erfolgt mit einem Thermistor in Brückenschaltung, dessen Nullinstrument direkt in mW geeicht wurde, was für kleine HF-Leistungen zulässig ist. Die Eichung der Brücke wurde nach zwei Verfahren durchgeführt, einmal mit einem Eichdämpfungsglied und das andere Mal nach dem Kompensationsverfahren. Beide Messungen ergaben gut übereinstimmende Werte, so daß bei späteren Kontrolleichungen der Brücke nur noch das erstgenannte [illegible] Verfahren angewendet werden konnte. Um Umbauten [illegible] zu vermeiden, wurde der Eichdämpfungsglied mit in die Schal[illegible]

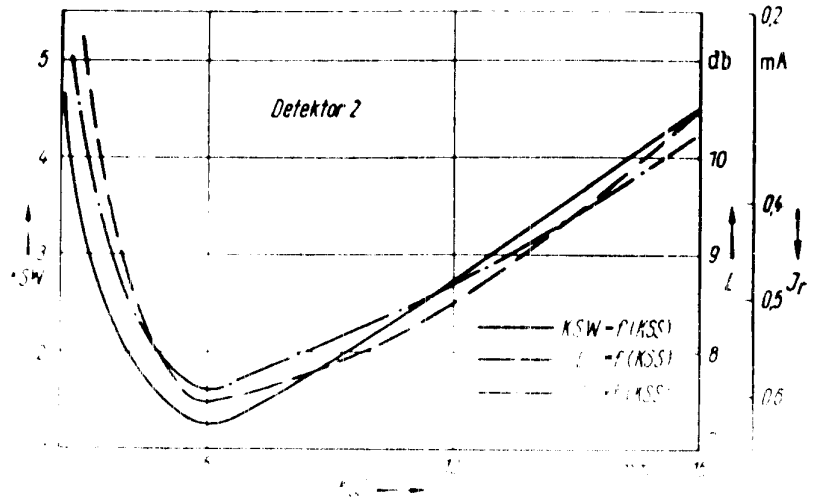
genommen. Für alle anderen Messungen wird diese Dämpfungsleitung auf eine bestimmte Vordämpfung eingestellt und vermindert so, da sie direkt auf den mechanischen Modulator folgt, die durch diesen hervorgerufene Welligkeit auf der Leitung.

Die Messung der Mischdämpfung erfolgt nach dem Schaltschema (Bild 13) so, daß die vom Klystron kommende Energie durch den Modulator mit einem bestimmten, vorher eingestellten Modulationsgrad moduliert wird. Der Modulator ist zwischen zwei Attenuatoren geschaltet, um die durch ihn hervorgerufene Welligkeit zu verringern. Durch den Hohlrohrschalter *Sch* ist es möglich, die Energie wahlweise auf den Thermistorkopf zu geben und damit die HF-Leistung N_0 zu messen oder auf den Detektorkopf zu leiten und damit die ZF-Leistung N_a zu messen. Für längere Meßreihen ist es zweckmäßig, vor den Umschalter einen Eingangsspannungsmesser zu schalten, um so laufend die richtige Größe der HF-Leistung kontrollieren zu können, ohne ständig zum Thermistor umschalten zu müssen.

Die Messungen an den ausländischen Detektoren ergaben Werte, die gut mit den Angaben der Literatur übereinstimmen. So ergab sich für den Typ 1 N 23 A eine mittlere Mischdämpfung von $L = 8{,}3$ dB und für Typ 1 N 23 B eine solche von $L = 6{,}5$ dB. Die unveränderten, selektiven MD 13 Detektoren hatten eine mittlere Mischdämpfung von etwa $L = 14$ dB. Durch Verbesserung der Anpassung und Breitbandigkeit in der vorher beschriebenen Weise wurden bei den gleichen Detektoren Mischdämpfungswerte von $L = 10$ bis 11 dB erreicht. Ähnliche Werte wurden mit den neuentwickelten Si-Dioden ähnlich Typ 1 N 23 des „Carl-von-Ossietzky"-Werkes erreicht, obwohl diese Detektoren eine sehr gute Anpassung aufwiesen und in bezug auf die Breitbandigkeit dem Typ 1 N 23 A und B entsprechen. Der Grund für die größere Mischdämpfung dieser Detektoren ist in den schlechteren Kristallen zu suchen, bei denen Bezirke der Defektelektronenleitung und der Elektronenleitung eng benachbart sind. Das geht schon aus der bei NF aufgenommenen Kennlinie hervor, die einen stark ausgeprägten exponentiell verlaufenden negativen Ast hat, der bei Berührung der Nadelspitze an bestimmten Punkten der Kristalloberfläche größer als der positive Ast werden kann (Umkehrung der Richtcharakteristik). Die Kristalle der ausländischen Detektoren dagegen haben eine sehr homogene Oberfläche, so daß der negative Ast praktisch nicht oder nur als Gerade sehr geringer Neigung in Erscheinung tritt. Zum Beweis der Abhängigkeit der Mischdämpfung von den verwendeten Kristallen wurde in einen Detektor neuen Typs des „Carl-von-Ossietzky"-Werkes ein Kristall aus einem Detektor vom Typ 1 N 23 A eingelötet, und es ergab sich eine Mischdämpfung von $L = 8{,}32$ dB, also ein Wert, der durchaus den mittleren Werten dieses Typs entspricht.

Für verschiedene Detektoren wurden Mischdämpfung, Anpassung und Richtstrom in Abhängigkeit von der Kurzschlußschieberstellung bei konstanter Frequenz und konstanter HF-Leistung gemessen und diese Werte über einer gemeinsamen x-Achse in Bild 14 aufgetragen. Dabei ergab sich, daß alle untersuchten Kenndaten der Detektoren die gleiche Charakteristik in Abhängigkeit von der Kurzschlußstellung haben, d. h., optimale Mischdämpfung, Anpassung und maximaler Richtstrom ergeben sich bei etwa dem gleichen Kurzschlußabstand, der für den Detektor charakteristisch ist. Falls als die [illegible] des Detektors auf optimale Anpassung bei einem K[illegible] des Fehlens eines

„Magischen T" nicht möglich ist, dann führt eine Einstellung auf optimalen Mischwirkungsgrad bzw. optimalen Richtstrom zum gleichen Ziel. Es ist jedoch nicht möglich, aus der Größe des Richtstromes Rückschlüsse auf die Größe der Mischdämpfung zu ziehen, da die Mischdämpfung außer von der Steilheit der Kennlinie noch von der Kurvenform abhängig ist.



[illegible] als Funktion der Kurzschlußschieberstellung

Nach der Beschreibung der einzelnen Meßmethoden zur Bestimmung der Kenngrößen von Si-Dioden im cm-Gebiet soll nun noch einiges über die Zusammenschaltung der einzelnen Bauelemente und Meßmittel für einen Meßplatz entsprechend dem Schaltschema Bild 15 gesagt werden, mit dem es möglich ist, [illegible] Kenngrößen durch einmaliges Einsetzen des Detektors in den Detektorhalter [illegible]

Zur Messung der Anpassung und Breitbandigkeit von Si-Dioden wird die Energie des Klystrons über die zur Entkopplung dienende Dämpfungsleitung *2* auf das „Magische T" gegeben. Die Dämpfungsleitung *1* wird für diese Messungen auf den größten Wert eingestellt, so daß praktisch keine Energie auf den unteren Zweig der Meßanordnung gelangt. Vom „Magischen T" gelangt die Energie weiter über die Umschalter *Sch 1* und *2* und die dazwischenliegende Meßleitung auf den Detektorkopf. Durch Verändern des Kurzschlußschieberabstandes bzw. durch Veränderung des Kontaktdruckes der Si-Diode bei bestimmtem *KSS*-Abstand ist es möglich, mit Hilfe des Nullindikators im „Magischen T" den Detektor zunächst auf optimale Anpassung einzustellen und dann die Größe des *KSW* mit Hilfe der Meßleitung zu bestimmen. Die Breitbandigkeit des Detektors läßt sich mit der gleichen An-

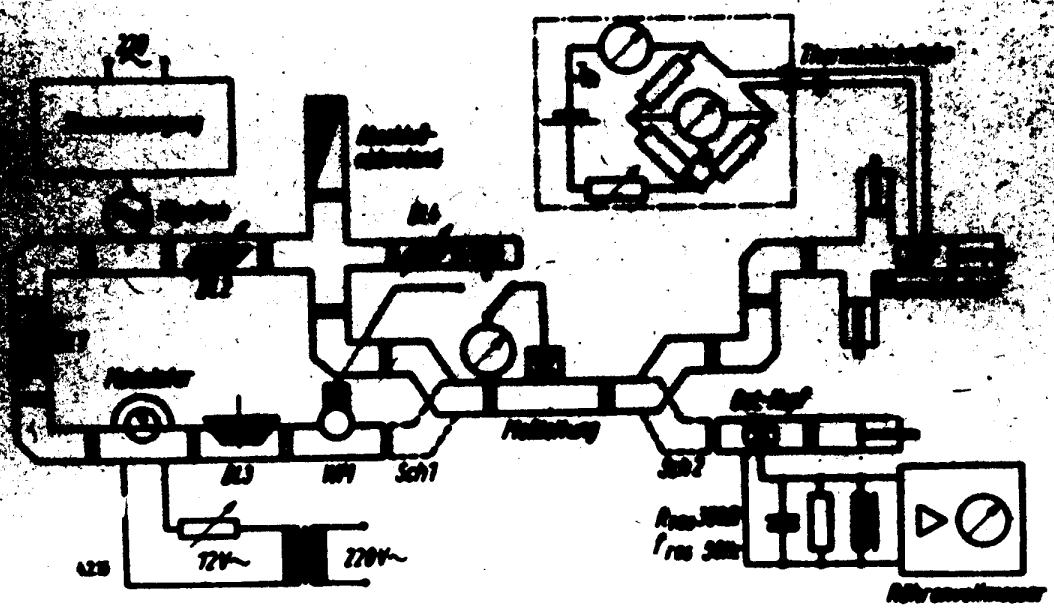


Bild 15. Detektormeßplatz

ordnung durch Messung der Anpassung in Abhängigkeit von der Kurzschlußschieberstellung in der schon vorher beschriebenen Weise bestimmen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Anpassung und die Impedanz der Si-Diode zu Vergleichszwecken direkt in Abhängigkeit von der Frequenz zu messen, indem man die Klystronenergie über den unteren Zweig der Meßanordnung mit Dämpfungsleitung *1*, den Modulator, Dämpfungsleitung *3* und den Wellenmesser auf die Meßleitung und den Detektorkopf gibt. Dämpfungsleitung *2* wird dazu auf den Maximalwert eingestellt.

Zur Messung der Mischdämpfung wird gleichfalls der untere Zweig der Meßanordnung benutzt. Zunächst wird der mechanische Modulator, der vorher auf einen bestimmten Modulationsgrad, z. B. 10%, eingestellt wurde, eingeschaltet und die Drehzahl des Motors so eingeregelt, daß sich maximaler Ausschlag am Pegelmesser ergibt. Danach wird durch Umschalten des Schalters *Sch 2* auf den Thermistorkopf die Eingangsleistung N_0 gemessen und durch Verändern der

Dämpfungsleitung l auf einen bestimmten Wert, z. B. 1 mW eingestellt. Durch Zurückschalten auf den Detektorkopf kann dann am Ausgangsschwingkreis mit dem Pegelmesser die Spannung U_a und damit die ZF-Ausgangsleistung gemessen werden. Aus den gemessenen Werten läßt sich dann nach der Formel

$$L = 10 \cdot \lg \frac{N_0 \, m^2}{N_a} \quad [\mathrm{dB}]$$

die Mischdämpfung berechnen.

Bei Verwendung entsprechender anderer Detektorköpfe lassen sich auch a[illegible] anderen Detektorarten, z. B. Typ ED 704 des „WF"-Werkes oder der sowjet[illegible] Typ KD 3 mit dem gleichen Meßplatz in der eben beschriebenen Weise d[illegible] messen.

43 Ohmsche Widerstände aus Verbundwerkstoffen

Dipl.-Ing. *H. Henniger*, Berlin

Widerstände aus massiven Werkstoffen

Elektrotechniker sind wir gewöhnt, die Werkstoffe in drei Hauptgruppen einzuteilen, die elektrischen Leiter, Halbleiter und Nichtleiter. Größenordnung des spezifischen Widerstandes dieser Gruppen sind aus Tafel 1 zu erkennen.

Tafel 1. Die drei Hauptgruppen der elektrotechnischen Werkstoffe

Gruppe	Spezifischer Widerstand in Ω mm²/m	Werkstoff
Leiter	10^{-8} bis 10	Metalle, Legierungen, Graphite
Halbleiter	10 bis 10^{12}	Metalloide, Karbide, Oxyde, Sulfide u. a.
Nichtleiter	10^{12} bis 10^{24}	Wachse, Plaste, Silikate

Bei dem kontinuierlichen Verlauf des Widerstandsspektrums erscheint es zunächst sehr einfach, allein durch die Wahl verschiedener Widerstandswerkstoffe ohmsche Widerstände in sehr verschiedenen Widerstandswerten als Massivleiter herzustellen. Beispielsweise würden sich daraus für Mikrowiderstände des Kleinstgerätebaus mit 1 mm² Querschnitt und 6 mm aktiver Länge Widerstandswerte von der Größenordnung 0,1 mΩ bis 10^{23} Ω ergeben. Man erkennt jedoch sehr bald, daß besondere technologische Bedingungen und spezielle Anforderungen an die Eigenschaften solcher Widerstände uns in der Wahl des Widerstandswerkstoffes ganz erheblich einschränken. Von Wichtigkeit sind die massenfabrikatorische Verarbeitbarkeit des Werkstoffes, seine mechanischen Festigkeitseigenschaften unter verschiedenen klimatischen Bedingungen, die Temperatur-, Frequenz- und Polaritätsabhängigkeit des spezifischen Widerstandes und noch manches andere.

Für die Herstellung technischer, spannungsunabhängiger ohmscher Widerstände mit kleinem Temperaturkoeffizienten kommen nur die metallischen und karbonischen Werkstoffe in Frage. Die eigentlichen Halbleiter scheiden wegen ihres hohen negativen Temperaturkoeffizienten oder ihrer starken Spannungs- oder Polaritätsabhängigkeit aus. Nichtleiter sind wegen ihres hohen spez. Widerstandes in reiner Form für die Herstellung von Widerstandselementen nur als Hilfsstoffe von Interesse. Das Spektrum der Widerstände für das erwähnte Beispiel von Mikrowiderständen aus Massivwerkstoffen beschränkt sich damit schon auf die Werte von 0,1 mΩ bis etwa 1 Ω, wenn man den spez. Widerstand einer durch Fremdstoffeinbau modifizierten Glanzkohlenstoffschicht mit etwa 150 Ω mm²/m ansetzt. Es ergibt sich damit die Aufgabe, den metallischen oder karbonischen

Massivleiter zu einem Gebilde umzugestalten, das bei gleichen äußeren geometrischen Abmessungen einen kleineren effektiven Querschnitt bzw. eine größere effektive Länge besitzt. Das bekannteste Beispiel für die Verminderung des effektiven Querschnitts und die Vergrößerung der effektiven Länge ist der zu einer Spule aufgewickelte Draht.

2. Widerstände aus Verbundwerkstoffen

Die klassischen Drahtwiderstände genügen jedoch aus den bekannten Gründen nicht den elektrischen Bedingungen der Hochfrequenztechnik. Diese Tatsache führte schon bald zur Anwendung von Verbundwerkstoffen. Wir verstehen darunter heute Werkstoffe, die aus mindestens zwei in ihren physikalischen Eigenschaften sich wesentlich unterscheidenden Grundstoffen aufgebaut sind. Vom Standpunkt des Elektrotechnikers interessieren dabei insbesondere natürlich die rein elektrischen Eigenschaften dieser Stoffe, etwa die Leitfähigkeit, sowie die dielektrischen und mechanischen Werte. Von Wichtigkeit sind auch die thermischen Eigenschaften und schließlich, bis zu einem gewissen Grade, die mechanischen Festigkeitswerte. Die Grundstoffe können dabei zur Gruppe der Organika oder Anorganika gehören.

2.1 Aufbau technischer Verbundwerkstoffe

Die Natur bietet uns Verbundwerkstoffe in starker Mannigfaltigkeit, denken wir nur an Erze, feuchtes Erdreich oder frisches Holz. Diese entsprechen jedoch in ihrer ursprünglichen Form den Bedingungen der modernen Elektrotechnik nur selten. Die natürlichen Verbundwerkstoffe waren jedoch in gewisser Hinsicht richtungweisend für die technischen, von denen uns hier die Kombinationen zwischen metallischen oder karbonischen Leitern auf der einen Seite und keramischen oder duroplastischen Nichtleitern auf der anderen Seite beschäftigen sollen.

2.11 *Mischkörper*

Die ältesten und technologisch einfachsten Kombinationen dieser Art sind Mischkörper aus Pulvern der genannten Werkstoffe. Die einzelnen, stark zerkleinerten Komponenten werden in engen mechanischen Kontakt miteinander gebracht und können durch Nachbehandlung bei geeigneten Temperaturen, begünstigt durch die große Oberfläche, zumindest an den Grenzflächen chemische Umwandlungen oder Veränderungen im Sinne einer Legierungsbildung durchmachen. Es ist schon sehr lange bekannt, daß nur geringe Mengen an leitenden Verunreinigungen den Widerstandswert eines Isolators um Zehnerpotenzen drücken können. Diese Tatsache bestätigt sich auch bei Mischkörpern für Widerstandszwecke. Dabei ist der Widerstandswert der Mischung von einem Grenzwert des Leitstoffzusatzes an mit größer werdendem Leitstoffanteil relativ gering veränderlich. Der kritische Grenzwert liegt bei einigen 10 Vol.-% Leitstoffanteil. Bei kleinerem Leitstoffgehalt nimmt der Widerstand eines Mischkörpers fast sprunghaft über Zehnerpotenzen zu. Während man diese Verhältnisse für elektrotechnische Zwecke schon vor etwa dreißig Jahren bei der Entwicklung von drahtlosen Widerständen für die Nachrichtentechnik in den Labors erkannt und praktisch berücksichtigt hatte, wurden solche Erkenntnisse in systematisch geordneter Form erst relativ spät veröffentlicht [1], [2]. Im Bild 1 ist die Abhängigkeit des spez. Widerstandswertes ausgehärteter Kunstharz-Rußmischungen vom Rußgehalt wiedergegeben.

Man erkennt, daß in diesem Falle die kritische Leitstoffmenge bei 25 bis 30 Vol.-% liegt. Massen derartigen Aufbaus werden für einen bestimmten Widerstandsbereich von Mischleiter-Schichtwiderständen verwendet. Unterhalb des kritischen Leitstoffgehaltes beginnen jedoch erhebliche Schwierigkeiten. Die große Steilheit der Widerstands-Leitstoffkennlinie bei kleinem Leitstoffgehalt deutet das bereits an.

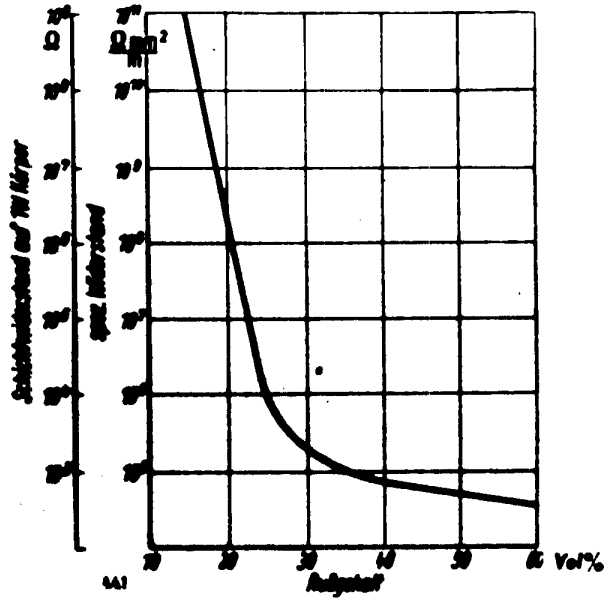


Bild 1. Widerstand aus gehärteten Kunstharz-Ruß-Schichten in Abhängigkeit vom Rußgehalt

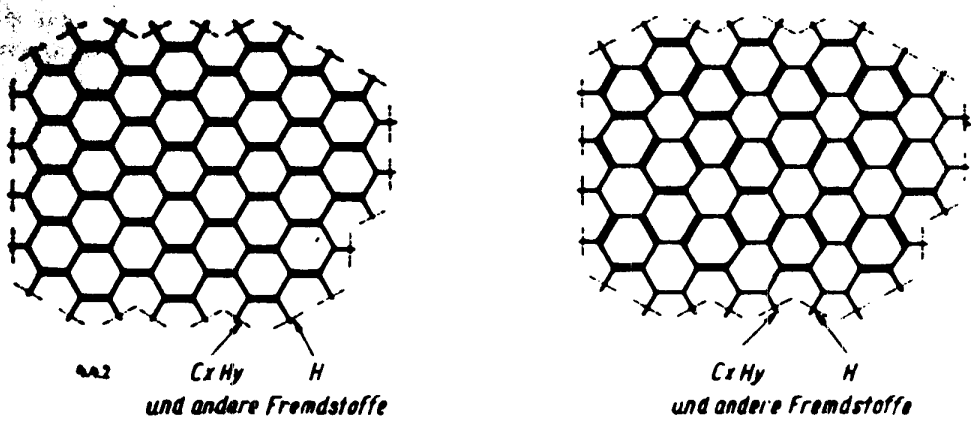


Bild 2. Randverhältnisse von atomaren Leitstoffschichten

Dazu unterliegen die wenigen nur noch vorhandenen Brücken, die eine gewisse Leitfähigkeit aufrechterhalten, infolge der aktiven Randeigenschaften der Teilchen starken Änderungen der Leitfähigkeit. Diese Störungen können durch Austausch von Gas, Feuchtigkeit oder anderen Fremdstoffen im Zusammenhang mit Temperaturschwankungen hervorgerufen werden. Im Bild 2 sind die Randverhältnisse einiger Leitstoffelemente wiedergegeben.

Von großer Bedeutung sind dabei auch die thermischen Dehnungsverhältnisse und die elastischen Eigenschaften der Mischkörperkomponenten. Von wesentlichem Einfluß sind ferner elektrische Felder im Zusammenwirken mit den obengenannten Einflüssen, was aus der starken Spannungsabhängigkeit von Widerständen hochohmiger Mischungen hervorgeht [3]. Eine Beseitigung, Milderung oder Verschiebung des charakteristischen Knickes einer Mischkörper-Widerstandskennlinie ist eine Frage der Art der Leitstoffverteilung.

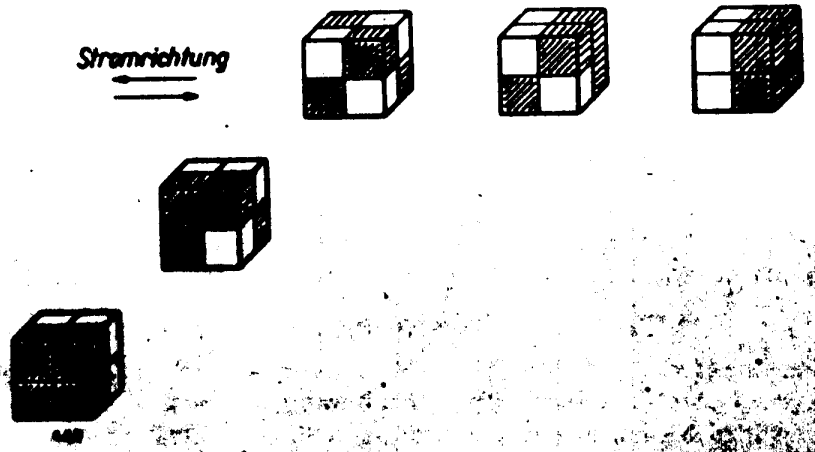


Bild 3. Würfel-Mischkörper aus vier Leiter- und vier Nichtleiterelementen in verschiedenen Anordnungen verschiedenen Widerstandes

Man betrachte dazu Bild 3.

Es zeigt das Modell eines würfelförmigen Mischkörpers aus vier Leiter- und vier Nichtleiterelementen. Außer der rein symmetrischen Verteilungsmöglichkeit sind vier unsymmetrische Kombinationen mit untereinander in Stromrichtung verschiedenem Widerstand möglich.

2.12 *Lamellarkörper*

Allein schon die Tatsache, daß die Mischkörpereigenschaften stark vom Verteilungszustand der Komponenten abhängen, daß also selbst bei relativ hohem Leitstoffanteil neben sehr hohen Widerständen sehr kleine auftreten, legt die Verteilung nach einem anderen System als nach dem normalen Mischprozeß nahe. Gelingt es beispielsweise, einen Würfel mit gleichen Abmessungen und gleichem Leitstoffgehalt wie in Bild 3 so aufzubauen, daß ein aus Isolierstoff bestehender Kern mit einer gleichmäßig dicken Leitstoffschicht allseitig überzogen ist, so hat ein solches Gebilde in allen Richtungen den gleichen Widerstand. Der Wert des Widerstandes kann je nach Dicke und Werkstoff der Leitstoffschicht verschieden hoch sein. Ein aus solchen Leitschichtelementen aufgebauter Widerstandskörper ist von gleichmäßig dicken leitenden Lamellen durchzogen. Wir wollen diesen Widerstandstyp daher auch Lamellarwiderstand nennen. Ein wesentliches Merkmal solcher Lamellarwiderstände ist die Tatsache, daß die Dickenabmessungen der Leitstoffschichten klein gegen die des Isolierkernes sind, was für die Wahl des Herstellungsverfahrens und die Rohstoffeigenschaften von besonderer Wichtigkeit ist (Bild 4).

2.13 *Kapillarkörper*

Man kann die Aufgabe der feinen und gleichmäßigen Leitstoffverteilung auch in umgekehrter Weise lösen. Ein Leitstoffkern ist zunächst von seinen Nachbarn durch nicht leitende Zwischenschichten getrennt. Man muß dafür sorgen, daß die

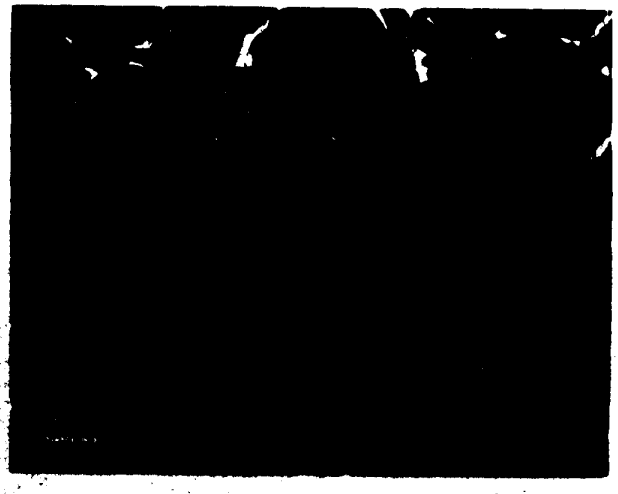


Bild 4. Schliffbild eines anorganischen Verbundwerkstoffes (Lamellarleiter)

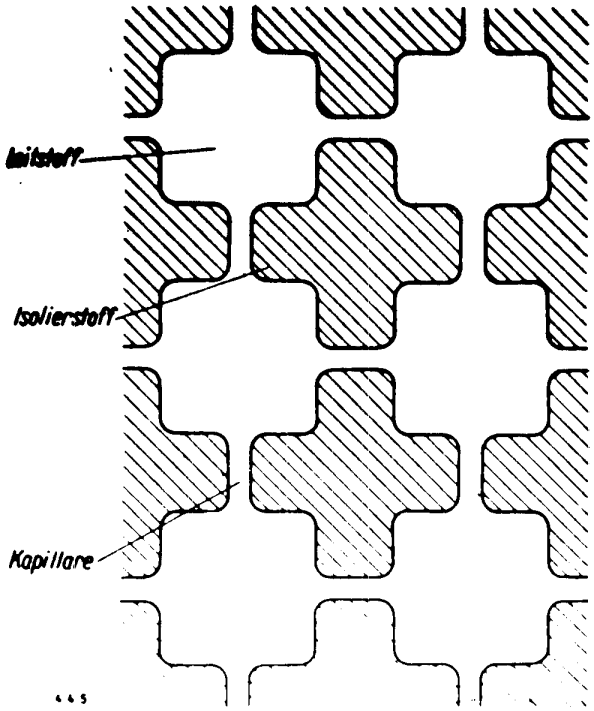


Bild 5. Schematische Darstellung eines Kapillarleiters

Kerne durch Poren der Trennwände hindurch strahlenförmig durch reine Leitstofffühler verbunden werden. Bei solchen Verbundstoffen wird der Widerstand der Anordnung durch Anzahl, Länge und Querschnitt der einzelnen Fühler bestimmt und nicht mehr vom kompakten, relativ groben Leitstoffkern. Anordnungen der genannten Art erzielt man beispielsweise durch Niederschlag von Leitstoffschichten in porösen Keramikteilen. Größere Hohlräume werden auf ihrer Innenfläche leitend gemacht und sind durch Leitstoffschichten oder -strahlen miteinander verbunden. *Meyer-Hartwig* [1] verwendet Metallpulver, die mit Isolierstoff überzogen sind. Durch Erhitzung diffundieren Metallteilchen durch die Isolierhaut und stellen mit ihren Nachbarn leitende Brücken über feine Strahlen her, er nennt solche Anordnungen Kapillarwiderstände. Wegen der hohen Vergütungstemperaturen kommen nur anorganische, vornehmlich Keramik-Metall-Kombinationen als Verbundstoffbildner in Frage (Bild 5).

2.2 Massiv-Verbund- und Schichtwiderstand

Man kann den Schichtwiderstand als eine Spezialform des Lamellarwiderstandes auffassen und einen Übergang zum Massivleiter finden. Aus diesem Vergleich [illegible] allgemeine Vorstellungen über das Spektrum der Widerstände [illegible] technisch möglicher [illegible] elektrisch [illegible] Eigenschaften ist. Man betrachte einen Würfel [illegible] Kantenlänge l/n (Bild 6). Die Würfelflächen seien in der Dicke [illegible] Widerstand ϱ belegt.

[illegible] durch zwei widerstandslose Elektroden an zwei [illegible] Würfelseiten zu- bzw. abgeführt wird. Der vom Strom durchflossene Querschnitt hat dann

$$f = 4\delta(l/n - \delta)\,. \qquad (1)$$

[illegible] auf [illegible] einen Würfel auf, so daß längs jeder [illegible] hintereinander liegen. Der gesamte Querschnitt der A[illegible]

$$F = 4\delta(l/n - \delta)\,n^2\,. \qquad (2)$$

[illegible] der Widerstand des lamellierten Würfels (Bild 6) zu

$$R_{\mathrm{Lam}} = \frac{\varrho\, n\, l/n}{4(l/n - \delta)\,n^2} = \frac{1}{n}\,\frac{\varrho\, l}{4\delta(l - n\delta)}\,. \qquad (3)$$

Für $l \gg n\,\delta$ ergibt sich der Näherungswert

$$R_{\mathrm{Lam}} \approx \frac{1}{n}\,\frac{\varrho}{4\delta}\,. \qquad (3a)$$

Mit $n = 1$ wird der Lamellarwiderstand zum Schichtwiderstand, und es ergibt sich für den Widerstand der Anordnung

$$R_{\mathrm{Schicht}} = \frac{\varrho\, l}{4\,\delta\,(l - \delta)}\,. \qquad (4)$$

Für $l \gg \delta$ vereinfacht sich dieser Ausdruck zu

$$R_{\mathrm{Schicht}} \approx \frac{\varrho}{4\,\delta}\,. \qquad (4a)$$

Für den Größtwert von δ

$$\delta = \frac{l}{2n}$$

ergibt sich aus Gl. (3) der Widerstandswert für den Massivwiderstand

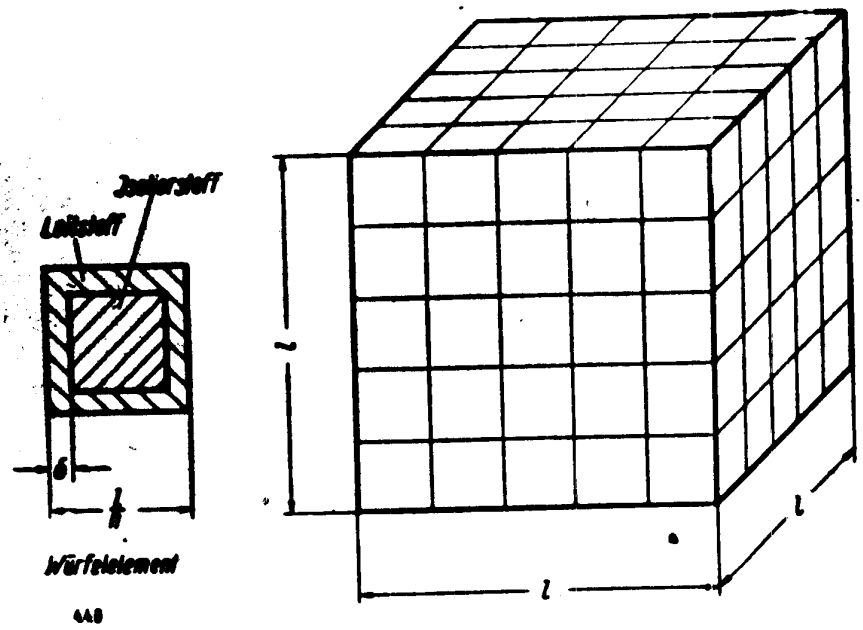
$$R_{\text{Massiv}} = \frac{\varrho\, l}{4\,\frac{l}{2n}\left(l - n\,\frac{l}{2n}\right) n} = \frac{\varrho}{l}. \tag{5}$$

$$R_{\text{Schicht}} = \frac{\varrho \cdot l}{4\,\delta\,(l-\delta)} > R_{\text{Lam}} = \frac{1}{n}\,\frac{\varrho \cdot l}{4\,\delta\,(l - n\,\delta)} > R_{\text{Massiv}} = \frac{\varrho}{l}$$

oder näherungsweise

$$R_{\text{Schicht}} \sim \frac{\varrho}{4\,\delta} > R_{\text{Lam}} \sim \frac{1}{n}\,\frac{\varrho}{4\,\delta} > R_{\text{Massiv}} = \frac{\varrho}{l}$$

für $l \gg \delta$ bzw. $l \gg n \cdot \delta$.



würfelförmiger Lamellarwiderstand

Bild 6. Zur Berechnung des Lamellarwiderstandes

Damit ist die Brücke geschlagen zwischen Schichtwiderstand, Lamellarwiderstand und Massivwiderstand, wobei

$$R_{\text{Schicht}} \sim \frac{\varrho}{4\,\delta} > R_{\text{Lam}} \sim \frac{1}{n}\,\frac{\varrho}{4\,\delta} > R_{\text{Massiv}} = \frac{\varrho}{l}$$

oder genauer

$$R_{\text{Schicht}} = \frac{\varrho\, l}{4\,\delta\,(l-\delta)} > R_{\text{Lam}} = \frac{1}{n}\,\frac{\varrho\, l}{4\,\delta\,(l - n\,\delta)} > R_{\text{Massiv}} = \frac{\varrho}{l}.$$

Bei praktischen Widerstandstypen ist — abgesehen vom meist kreisförmigen Querschnitt — die Länge L ein Vielfaches der [illegible] Querabmessung l, so daß in diesem Falle die Ergebnisse der [illegible] 3, 3a, 4, 4a [illegible] mit dem Verhältnis L/l zu multiplizieren sind.

2.3 Anwendung technischer Verbundwerkstoffe

2.31 *Verbundschichtwiderstände*

Lamellarverbundwiderstände in Schichtausführung bestehen im wesentlichen aus einer anorganischen Isolierstoffkomponente und einem metallischen, oxydischen oder karbonischen Leitstoff. Sie werden im allgemeinen in Schichtstärken von etwa $5 \cdot 10^{-2}$ mm auf geeigneten Trägerwerkstoffen hergestellt. Während die älteren Verfahren dieser Art auf die Eigenschaften eines normalen Mischleiters hinausliefen, gelang es, bei den Lamellarschichten bedeutend günstigere Eigenschaften zu erreichen. Im wesentlichen sind es drei Faktoren, die zu diesen günstigen Verhältnissen führen.

2.311 Der Leitstoff

Der Leitstoff muß so weit unterteilt sein, daß er sich in Leitelementen kleinen Querschnitts und möglichst großer Länge verteilen läßt. Mit gewöhnlichem Ruß läßt sich das wegen seiner im allgemeinen größeren Neigung zur Bildung von Sekundäragglomeraten als zur gleichmäßigen, dünnschichtigen Anlagerung auf der Oberfläche der Isolierstoffkomponente nur schwer erreichen. Man setzt den Kohlenstoff der Isolierstoffkomponente daher besser in echter Lösung zu. Nach Diffusion liegt der Kohlenstoff dann in sehr dünnen Schichten gleichmäßig über Grenzflächen des Isolierstoffes verteilt vor. Die freien Valenzen des Kohlenstoffes sättigen sich weniger gegenseitig als vielmehr zu Oberflächen des Isolierstoffes.

2.312 Grenzflächenstabilisierung

Nachdem man so einen Teil der Aktivität der großen Leitstoffoberflächen für nutzbringend für eine homogene Verteilung verwertet hat, gilt es die restlichen freien Valenzen abzusättigen, und zwar mit Elementen, die zugleich besondere Vorteile bringen. Im allgemeinen lagern Gase, Feuchtigkeit, Kohlenwasserstoffmoleküle oder andere unerwünschte Stoffe an den Rändern, die man zunächst durch Vakuumglühung entfernen muß. Jedoch ist eine Glühung allein zur Stabilisierung der Randschichten nicht ausreichend. Es würden sich ohne Luftabschluß sofort wieder Gase, Wasser und Lösungsmittel anlagern, und man hätte nichts erreicht. Man soll vielmehr sogleich im Anschluß an die Vakuumglühung geeignete Substanzen bei geeigneter Temperatur eine Absättigung vornehmen. Die stabilisierenden Stoffe sollen dabei zugleich dem Leitstoff einen geeigneten spez. Widerstandswert geben. Zu diesen elektrisch günstigen Absättigungsstoffen gehören einige Metalloide, u. a. das Element Bor [4].

2.313 Isolierstoff

Der Isolierstoff soll so beschaffen sein, daß er eine gleichmäßige Verteilung des Leitstoffes auf seiner Oberfläche fördert. Man erreicht dies beispielsweise durch Anwendung von Kunstharzen mit aktiven Stellen, die eine Neigung zur Bindung von Kohlenstoff zeigen. U. a. sind zu diesem Zwecke bestimmte Typen der Silikone verwendet worden.

2.32 *Verbundvolumenwiderstände*

Volumenwiderstände bestehen in ihrem gesamten Querschnitt aus Widerstandsmasse, sind also im Gegensatz zu Schichtwiderständen selbsttragend. Man stellt solche Vollwiderstände durch Pressen, Spritzpressen oder Strangpressen mit nach-

folgender Wärmebehandlung her. Die Leitstoffverteilung im Verbundwerkstoff für Volumenwiderstände unterliegt den gleichen Prinzipien wie für Lamellarschichtwiderstände. Auch hier ist für die Art der Leitstoffeinbringung wichtig, ob es sich um organischen oder anorganischen Isolierstoff handelt. Bei Anwendung anorganischer Isolierstoffe lassen sich Leitstoffkomponenten nach dem Verfahren der thermischen Spaltung herstellen. So kann man auf isolierenden Pulverwerkstoffen Widerstandsschichten aus Glanzkohle durch thermische Spaltung flüchtiger Kohlenwasserstoffe nach den bekannten Methoden im Vakuum oder Schutzgas [illegible]stellen. Außer der reinen Glanzkohle können Mehrstoffsysteme aufgetragen [illegible]den, wie beispielsweise Borkohleschichten [4]. Ähnlich lassen sich Metallschichten [illegible]gen. Man verwendet dazu nicht die üblichen Verfahren der Bedampfung [illegible]tonzerstäubung, sondern Methoden, die dem Prinzip der Vakuum-[illegible] ähnlich sind, bei denen flüchtige Metallverbindungen gespalten und [illegible]gen werden. Es eignen sich dazu z. B. Karbonyle verschiedener Metalle. [illegible]same Dissoziation verschiedener Karbonyle lassen sich Legierungen [illegible] Zusammensetzung herstellen [5]. Die Herstellung dünner Schichten [illegible] ihren Legierungen sowie aus Kohlenstoff und seinen Systemen [illegible] ist aus der Schichtwiderstandstechnik hinreichend bekannt. [illegible] daher die Erfahrungen auf diesem Gebiete in der Technik der [illegible] zunutze machen.

[illegible]. Widerstand ϱ und gleicher Schichtdicke δ ist in erster Näherung [illegible]stand nur 1/n so groß wie der homogene Schichtwiderstand, [illegible] Anzahl der Lamellarelemente senkrecht zur Längsachse des Wider-

[illegible]ung dünner Glanzkohleschichten sei gegeben:

[illegible] mm,
[illegible] mm,
[illegible] $= 94\ \Omega\ \mathrm{mm^2/m}$,
[illegible] $= 5 \cdot 10^{-6}$ mm.

[illegible] sich für den Schichtwiderstand nach Gl. (4)

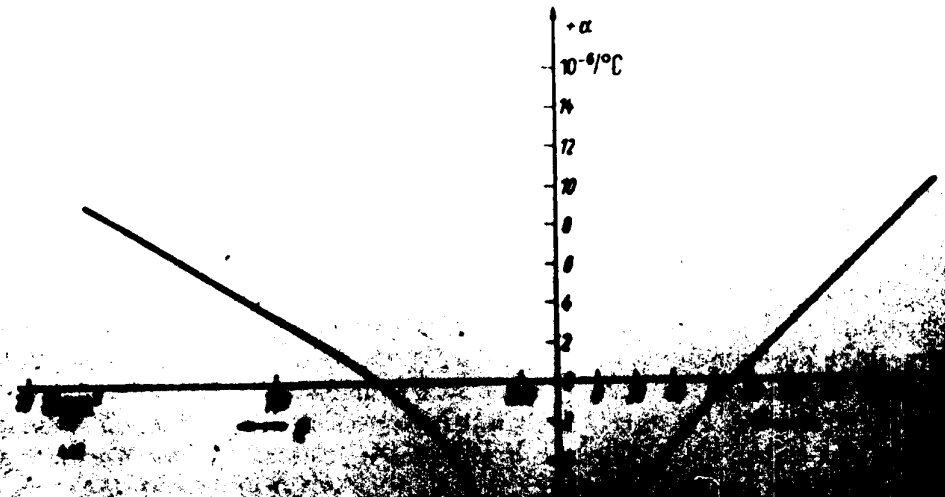
$$R_{\text{Schicht}} = 6\ \mathrm{k}\Omega .$$

[illegible] man Lamellarelemente mit den Abmessungen $< \frac{1}{10}$ mm voraus, so wird nach Gl. (3)

$$R_{\text{Lamellar}} < 0{,}6\ \mathrm{k}\Omega .$$

Da die oben angegebene Schichtdicke bei stabilen Widerständen nicht mehr wesentlich unterschritten werden kann [4], sind bei Glanzkohlelamellarsystemen keine wesentlich höheren Widerstandswerte zu erwarten. Vorausgesetzt ist dabei, daß zwischen den einzelnen Lamellarelementen in Stromrichtung keine Übergangswiderstände auftreten. Bei der Verwendung von Rußschichten dagegen als Leitstoff, die im Abriebverfahren oder durch Niederschlag auf den Isolierstoffelementen erzeugt werden, ist wegen der ungeordneten Orientierung der Mikrokristallite und ihrer Grenzflächenstruktur sowohl mit einem wesentlich höheren spez. Widerstand in der Schicht zu rechnen als auch mit beträchtlichen Übergangswiderständen zwischen den einzelnen Schichten. Solche Widerstände entfernen sich mit höher werdenden Widerstandswerten immer mehr von den Eigenschaften des wahren Lamellarleiters und nähern sich immer mehr denen des einfachen

Mischleiters. Die elektrischen Eigenschaften solcher Kontaktmischleiter sind nicht aus denen des Leitstoffes in entsprechend dünner Schicht abzuleiten. Während der spez. Widerstand von Glanzkohleschichten in weiten Bereichen von der Schichtstärke unabhängig ist [4], besteht bei nicht zu dünnen Metallschichten



ϱ in $\frac{\Omega\,mm^2}{m}$	δ in 10^{-6} mm	α in $10^{-6}/°C$
0,072	Kompakt	+ 61
17,2	172	+ 9,2
106	106	+ 3,3
440	44	— 2,6
700	7	— 8,6

Der Verlauf der Funktionen $\alpha = f(\delta)$ und $\alpha = f(\varrho)$ ist für Nickel im Bild wiedergegeben.

Man erkennt, daß eine Abweichung von der Geraden erst bei Schichtstärken unter etwa 25 mμ eintritt. Für die Berechnung von Lamellarwiderständen ist nun

wichtig, daß man die erhöhte Schichtstärke im Innern des Körpers beim Einsetzen des spez. Widerstandes berücksichtigt. Bei nicht zu kleinem n wäre im Grenzfall der spez. Widerstand für den Lamellarwiderstand entsprechend der doppelten Schichtdicke einzusetzen. Entsprechend dem obigen Beispiel ergibt sich bei Nickel von $\varrho = 700\ \Omega\ \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$ und $\delta = 7 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{mm}$

$$R_{\mathrm{Schicht}} = 125\ \mathrm{k}\Omega$$

und

$$12{,}5\ \mathrm{k}\Omega > R_{\mathrm{Lamellar}} > 7{,}9\ \mathrm{k}\Omega\,,$$

entsprechend einem spez. Widerstand des Lamellarwiderstandes von $\varrho_{\mathrm{Lam}} = 2 \cdot 10^6\ \Omega\ \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$.

In beiden Beispielen ist jedoch eine Abweichung der praktischen Werte von den theoretischen wegen des nicht berücksichtigten Porengehalts und des Einflusses der beim Verformungs- und Sinterungsvorgang auftretenden Erscheinungen zu erwarten, die teils einen höheren, teils einen niederen Wert bedingen. In der Praxis wird man außerdem vorzugsweise Legierungen verwenden und bei Metall-Lamellarsystemen etwa bis zum 10fachen Widerstandswert erreichen können.

Bei Kapillarsystemen mit Aluminium als Leitstoff schätzt *Meyer-Hartwig* [1] bei $8 \cdot 10^6\ \Omega\ \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$ einen mittleren Kapillarendurchmesser von 10^{-6} mm, was etwa 10 bis 15 Leiteratomen im Querschnitt entspricht. Diese Verhältnisse treffen etwa die Grenze des mit derartigen Metallnetzwerken erreichten maximalen Widerstandes für technisch brauchbare und entsprechend stabile Anordnungen.

2.321 Impulswiderstände

Die häufig anzutreffende Auffassung, daß Volumenwiderstände von vornherein gegenüber Schichtwiderständen in eine niedere Güteklasse einzustufen sind, ist

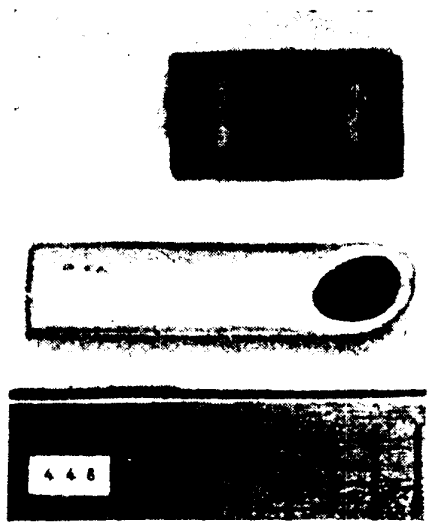


Bild 8. Ummantelte Entstörungswiderstände

nicht richtig. Ein Vergleich der genannten Widerstandstypen ist ohne Berücksichtigung ihrer speziellen Anwendungsgebiete nicht durchführbar.

Das spezielle Anwendungsgebiet [illegible] Anwendung für Impulsbeanspruchung [illegible]

Schichten aufgeteilte Leitstoffe laufen Gefahr, bei hohen Impulsstromstärken in normaler Atmosphäre in widerstandshöhere chemische Umwandlungsprodukte übergeführt zu werden. Bei Schichtwiderständen sind diese Vorgänge kaum zu vermeiden, da sich die gesamte stromführende Oberfläche unmittelbar in Berührung mit der atmosphärischen Luft befindet. Anders dagegen bei Volumenwiderständen. Die leitende Oberfläche dieser Widerstände stellt nur einen Bruchteil des gesamten Widerstandsquerschnitts dar. Die inneren Querschnittspartien sind bei gasdichten Verbundwerkstoffen dagegen völlig sauerstoffgeschützt. Für besonders schwere Bedingungen wird man sogar noch einen Schritt weitergehen und den leitenden Kern durch eine nichtleitende, gasdichte Hülle schützen. Dieser Schutz kann in Form einer organischen Preßhaut oder Umpressung vorliegen, kann durch Lagerung der Verbundkörper in oxydierender Atmosphäre erfolgen und kann [illegible]

Mikrowiderstand

Mikrowi[illegible]

4.4.8.

lich aus einem evtl. [illegible] oder Lack bestehen. [illegible] stände ist ihre Verwendung [illegible] Hochspannungsfindanlagen an Ozonatoren [7] [illegible]

Weitere Anwendungsgebiete für Impulswiderstände ergeben sich aus den Aufgaben der Sicherungstechnik von Hochspannungsanlagen und schließlich aus den Aufgaben von impulsbetriebenen Nachrichtengeräten.

2.322 Kleinst- und Mikrowiderstände

Kleinst- und Mikrowiderstände, wie sie in Geräten der Transistortechnik (Bild [illegible]) und anderen Kleinstgeräten der Nachrichtentechnik benötigt werden, lassen sich als Volumenwiderstände besonders wirtschaftlich herstellen.

Die Lötanschlüsse werden stirnseitig unmittelbar angesintert, ohne eine Kappe zu verwenden. Man umgeht dadurch nicht nur Schwierigkeiten der mechanischen

Toleranzen zwischen Kappe und Stab, sondern erniedrigt damit auch erheblich die Kapazität des Widerstandes bei gleichzeitig erhöhter aktiver Oberfläche. Es gelingt auf diese Weise, $^1/_{20}$ W- bis $^1/_{10}$ W-Widerstände in den Abmessungen 1,5 Dmr. · 7 mm herzustellen. Die Hochfrequenzeigenschaften dieser Widerstände sind ausreichend. Sie sind aus Bild 10, 11, 12 zu erkennen.

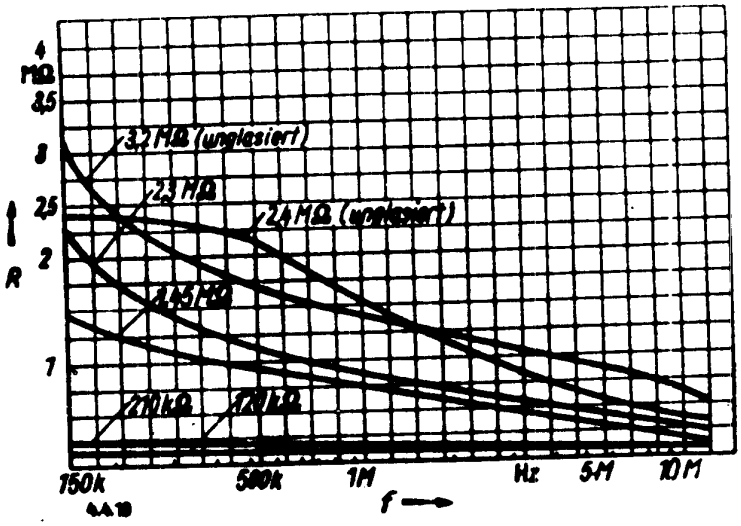


Bild 10. Frequenzgang des Wirkwiderstandes von Mikrowiderständen

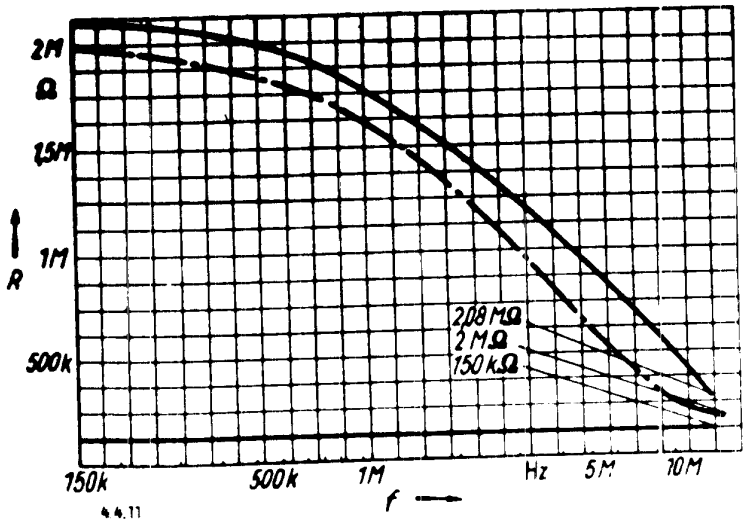


Bild 11. Frequenzgang des Wirkwiderstandes von $^1/_{20}$ W-Schichtwiderständen

Man erkennt daraus, daß der Wirkwiderstand der genannten Mikrowiderstände mindestens dem der Schichtwiderstände ähnlich DIN 41398 und DIN 41399 mit den Abmessungen 3,5 Dmr. · 8 mm oder 3,5 Dmr. · 12 mm entspricht.

2.323 Hochlastwiderstände und Infrarotstrahler

Ein weiteres Gebiet der Volumenwiderstände aus Verbundwerkstoffen [illegible] insbesondere niederohmige Hochlastwiderstände bzw. spezielle Infrarot-D[illegible] strahler. Verbundwiderstände lassen sich als Kapillarleiter mit einer Le[illegible] phase des Systems $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ und einer Leitstoffphase mit [illegible]

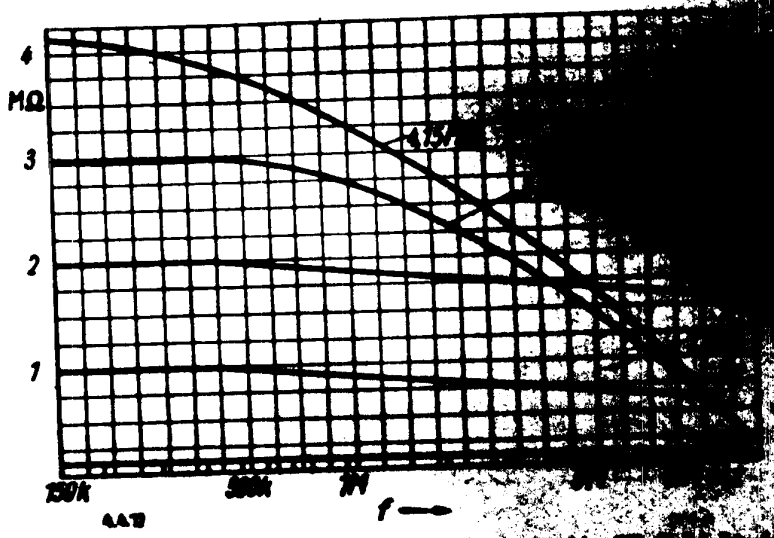


Bild 12. Frequenzgang des Wirkwiderstandes [illegible]

Nickel-Eisen-Legierung in Werten des spez. Wi[illegible] etwa 10^3 Ω mm²/m in verkleinerten Abmessungen [illegible] aktiver Länge und etwa 4 bis 6 mm Dmr. ergeben sich [illegible] 0,1 bis 10 Ω. Dieses Widerstandsgebiet wird gerade zur [illegible]

Bild 13. Kapillar[illegible]

Widerstandswerte von glasierten oder zemen[illegible] benötigt. Da die Flächenlast dieser niederohmigen [illegible] höher liegen kann als bei glasierten Drahtwiderständen (3 bis 5 W/cm² [illegible] 1,5 W/cm²), ergeben sich, wie schon oben angedeutet, besonders kleine Ab[illegible] was für den Einbau in Fahrzeuge und bewegliche Einrichtungen von Bedeutung [illegible]

Auch für spezielle Zwecke in der Infrarot-Technik können solche Kapillarwider[illegible] stände (Bild 13) eingesetzt werden. Das Energiespektrum eines solchen Strahler[illegible] ist aus Bild 14 zu erkennen.

8. Wirtschaftliche Bedeutung

Die wirtschaftliche Bedeutung von ohmschen Widerständen aus Verbundwerkstoffen liegt auf den Gebieten der Einsparung und der erhöhten Arbeitsproduktivität.

3.1 Einsparung

Es sollen zwei Widerstände von je 0,5 Ω verglichen werden. Einmal wird ein Konstantandraht von 1 m Länge und 1 mm² verwendet, der auf einen Körper mit den ungefähren Abmessungen 15 mm Dmr. und 62 mm Gesamtlänge (44 mm aktive Länge) aufgewickelt ist. Zum anderen kommt ein Kapillarleiter von 40 mm

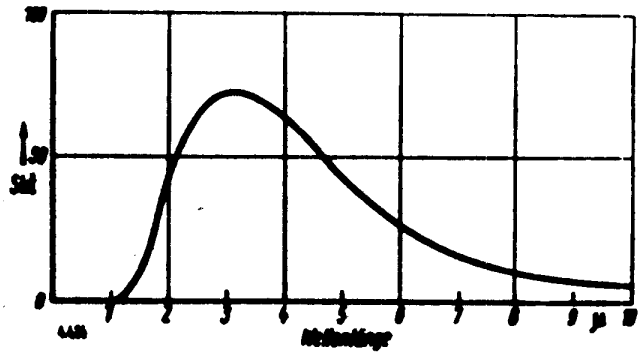


Bild 14. Spektrale Energieverteilung eines I.R. Kapillarleiters bei einer Flächenbelastung von 6 W/cm²

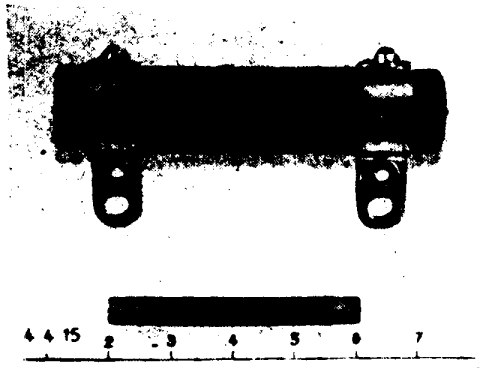


Bild 15. Vergleich von Drahtwiderstand und Kapillarwiderstand annähernd gleicher Leistung

Gesamtlänge (30 mm aktive Länge) und 6 mm Dmr. zur Verwendung. Die Volumina der Widerstände verhalten sich bei vergleichbarer Belastbarkeit wie 10 : 1 (Bild 15). Im gleichen Verhältnis steht der Bedarf an Nickel. Der Vergleich ist in Tafel 3 zusammengestellt. Soweit es sich um hochohmige Widerstände handelt, fällt noch die Ersparnis von kostspieligen Feinstdrähten ins Gewicht.

Tafel 3. Vergleich von Drahtwiderstand und Kapillarwiderstand (in abgerundeten Zahlen).

	Drahtwiderstand (aus Konstantan) 15 Dmr. · 62 mm	Kapillarwiderstand (aus Eisen-Nickel) 6 Dmr. · 40 mm
Volumen in cm³	11	1,1
Widerstandsgewicht in g . . .	25	3,5
Drahtgewicht in g	9	—
Nickelgewicht in g	4	0,4
[illegible] in g	5	—
[illegible] in cm³ . .	21	6
[illegible] in W	30	25

[illegible] in der Technik [illegible] einfach [illegible] Abstände [illegible] die Tülle [illegible]

[illegible] kontinuierlichen Übergang [illegible] Zeitschrift f. Metallkunde [illegible]

[illegible] Untersuchungen an gesinterten Verbund[illegible] metallischen Bestandteilen. Wissen[illegible] Dresden 3 H. 1 (1953/54) S. 71—[illegible]

[3] [illegible]: Über die [illegible] Eigenschaften von kolloidalen [illegible] und Nichtkörpern und ihre Verwendung zur Herstellung nichtlinearer [illegible] stände. AEÜ 6 ([illegible]) S. [illegible]

[4] *Faller, Henniger, Müller:* Schichtwiderstände als Präzisionsbauelemente [illegible] Nachrichtentechnik. Nachrichtentechnik H. 11 (1954) S. 480—483.

[5] *Seliseki, Krylow, Wolkow:* Röntgenstrukturuntersuchungen an [illegible]förmigen Nickel-Eisenlegierungen, die durch Spaltung von Karbonyl gewonnen wurden. ЖТФ (sowjetisch) Zeitschrift für technische Physik 22 Au[illegible] (1952) S. 1726—1729.

[6] *Schulze, Eicke:* Über Metallschichtwiderstände. Elektrotechnik H. 12 (1[illegible] S. 616—619; Metall H. 3/4 (1953) S. 106 u. H. 5/6 (1953) S. 172.

[7] *Henniger:* Widerstände zur Funkentstörung von Ottomotoren. Nachrichten[illegible] technik 5 (1955) H. 4, S. 166.

4.4 Elektrolyt- oder Tantalkondensator

Ing.-Chem. *P. Werner*, Berlin

Elektrolyt- oder Ta-Kondensator, diese Fragestellung ist außerordentlich wichtig und zugleich interessant. Die Notwendigkeit, diese Frage anzuschneiden, entstand, da einmal die Geräteindustrie immer kleinere Kondensatoren zum Bau kleinerer und preiswerterer Nachrichtengeräte fordert und weil vor einiger Zeit auf dem Kondensatorenmarkt englische und amerikanische Elektrolytkondensatoren erschienen, die in der Kleinheit ihrer Abmessungen alles bisher Vorhandene übertrafen. Es zeigte sich, daß diese kleinen Elektrolytkondensatoren nicht wie üblich Aluminium als Ventilmetall enthielten, sondern daß hier Tantal verwendet worden war. Zur Unterscheidung von den Elektrolytkondensatoren mit Aluminium (Al) als Ventilmetall wurde für die neuen Elektrolytkondensatoren mit Tantal (Ta) die Bezeichnung „Ta-Kondensator" eingeführt.

Die Verwendung von Tantal als Ventilmetall für Elektrolytkondensatoren ist [illegible] nicht neu. So ist schon von *A. Güntherschulze* und *H. Betz* [1] im Jahre [illegible] die Anwendung von Tantal beschrieben.

Der Zwang der allgemeinen technischen Entwicklung ergab sich auch in unserer Industrie die Notwendigkeit, ebenfalls zu kleinen Kondensatoren zu gelangen, um eine [illegible], volumengleiche Anpassung an die Transistoren und andere Kleinstbauelemente zu erreichen. Bevor man jedoch mit diesen Entwicklungsarbeiten beginnt, ist es zweckmäßig, sich darüber Klarheit zu verschaffen, ob sich ein wirklicher Fortschritt durch Anwendung von Tantal in Elektrolytkondensatoren erzielen läßt und in diesem Zusammenhang, ob die Möglichkeiten des Al-Elektrolytkondensators bereits restlos ausgeschöpft sind.

Es ist Aufgabe der folgenden Ausführungen, hier Klarheit zu schaffen.

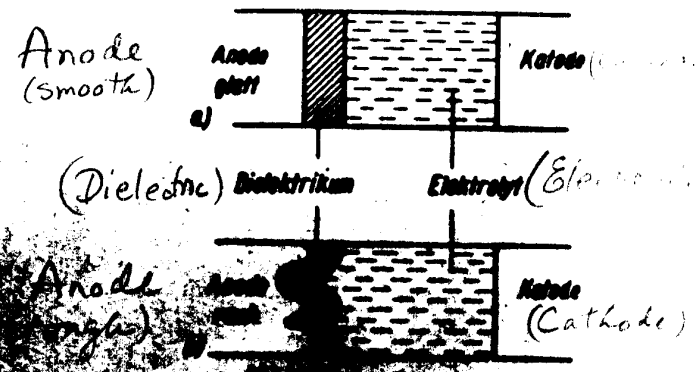
Für die Beurteilung dieser Fragen ist der Vergleich einiger Kondensatorenkennzahlen erforderlich, von denen besonders folgende wichtig sind:

1. Bereich der Arbeitsspannung,
2. Kapazität je Volumeneinheit, $\mu F/cm^3$,
3. Reststrom, I_R, als Gütezahl für den Isolationswiderstand,
4. Temperaturabhängigkeit,
5. Frequenzabhängigkeit,
6. Preis.

Die folgenden Angaben über die Ta-Kondensatoren entstammen den Veröffentlichungen von *Foster* [2] und *E. Flötenmeyer* [3]. Der prinzipielle Aufbau beider Kondensatorenarten unterscheidet sich nicht voneinander. Im Bild 1, a ist der prinzipielle Aufbau von Elektrolytkondensatoren unabhängig von der Art des Ventilmetalles gezeigt. Auf einer aus Ventilmetall bestehenden Anode befindet sich das Dielektrikum, je nach Arbeitsspannung des Kondensators, in einer Dicke von 10^{-6} bis 10^{-5} cm. Als negative Stromzuführung dient eine zweite Metallelek-

trode, die Katode. Zwischen den beiden Elektroden befindet sich der Elektr[illegible] der sowohl als Spannungszuführung an das Dielektrikum als auch zur Aufr[illegible] erhaltung des im Dielektrikum herrschenden Ionengleichgewichtes dient.

Bei den Kondensatoren mit Aluminium als Ventilmetall besteht das Di[illegible] kum aus elektrolytisch erzeugtem Aluminiumoxyd, Al_2O_3, bei den Ta-K[illegible] satoren aus Tantaloxyd, Ta_2O_5. Unterschiede zwischen diesen beiden D[illegible] bestehen in der Dielektrizitätskonstante ε, sie ist für Al_2O_3 7,45 und 11,5. Außerdem besitzt Ta_2O_5 eine geringere Schichtdicke, sie ist [illegible] Spannung um etwa 25 % kleiner als bei Al_2O_3. Beide Faktoren erg[illegible] Ta-Kondensator bei sonst gleichem Aufbau eine größere Kapazität.



[illegible] 1. [illegible] Elektrolytkondensatoren
[illegible] Anodenmaterial

[illegible] bekanntlich eine Vergrößerung [illegible] Kapazitätserhöhung erzielt werden. [illegible] die Oberflächenaufrauhung [illegible] Faktor α: $\alpha = 3$, d.h., die [illegible] die [illegible] Kapazität. [illegible]

1. Bereich der Arbeitsspannung

Ta-Kondensatoren können nur bis zu einer Spannung [illegible] werden; Al-Elektrolytkondensatoren dagegen bis zu 500 V.

Bei Anwendung für höhere Spannungen als 150 V muß [illegible] zahl von Ta-Kondensatoren in Reihe geschaltet werden. Zur [illegible] nungsverteilung auf die in Reihe geschalteten Kondensatoren [illegible] parallel zu den Kondensatoren Widerstände zu schalten. Es ist [illegible] dadurch höhere Kosten entstehen als bei Anwendung von Al-K[illegible]

In bezug auf Arbeitsspannung sind die Ta-Kondensatoren gegenüber den Al-Elektrolytkondensatoren unterlegen.

2. Kapazität pro Volumeneinheit, µF je cm³

Das Volumen der Bauelemente wirkt sich nicht nur auf das Gesamtvolumen der Nachrichtengeräte aus, sondern auch auf ihr Gewicht. Dies wiederum ist für den Frachtpreis von Exportgeräten von Interesse. Für einen Ta-Kondensator

1 μF, 150 V ist nach *Flötenmeyer* eine Anodenfläche von 20 cm² erforderlich. Vergleichen wir diesen Wert mit den Verhältnissen bei Aluminium, so ergibt sich ein Bild entsprechend Tafel 1.

Verglichen mit rauhen Al-Flächen, die seit 15 Jahren das Feld beherrschen, zeigt Tantal gegenüber Aluminium keinen Vorteil.

Überträgt man den Flächenvergleich auf das Volumen, so ergibt Tantal auch kein günstigeres Bild. In Tafel 2 sind vergleichbare Kondensatoren gegenübergestellt, wobei die auf der Leipziger Messe 1954 vom VEB Tonmechanik erstmalig gezeigten Kleinst-Elektrolytkondensatoren als Vergleich herangezogen wurden, weil diese den neuesten Entwicklungsstand in der DDR darstellen.

Man sieht, daß das außerordentlich kleine Volumen der Ta-Kondensatoren auch mit Aluminium erreicht werden kann. Die dazu nötige Oberflächenaufrauhung des Aluminiums entspricht nur dem Faktor $\alpha = 4{,}1$. Das wiederum ist eine Oberflächenaufrauhung, die technisch ohne weiteres möglich ist. Die Industrie verwendet sogar meist den Faktor $\alpha = 5$. Mit Erhöhung des Aufrauhgrades von Al-Elektroden haben wir also ein Mittel zur weiteren Raumverkleinerung des Al-Kondensators in der Hand.

Mit einer noch weiteren Raumverkleinerung der Ta-Kondensatoren durch Aufrauhung ist kaum zu rechnen, da einerseits eine chemische Aufrauhung des Tantals wegen der großen chemischen Resistenz nicht möglich ist, andererseits eine mechanische Aufrauhung nur einen unbedeutenden Oberflächengewinn bringt. Bei diesen Ta-Kondensatoren werden schon Sinterelektroden verwandt, die schon ein Maximum der Oberflächenvergrößerung aufweisen.

Also auch in bezug auf Raumbedarf bietet der Ta-Kondensator keinen Vorteil gegenüber Elektrolytkondensatoren modernster Konstruktion.

2. Reststrom, I_R

Der Reststrom, auch Leckstrom genannt, ist eine relativ schlechte Eigenschaft der Elektrolytkondensatoren. Er kann sich störend bei der Anwendung der Kondensatoren auswirken. Beim Anlegen einer Spannung fließt nach dem Ladestrom noch ein Reststrom, der mit der Zeit abfällt und schließlich einen Endwert erreicht. Dieser Endwert soll sich möglichst schnell einstellen. Bei Elektrolytkondensatoren geschieht dies normalerweise innerhalb von 1 bis 5 min.

In der amerikanischen Literatur [2] wird es als ein Nachteil der Ta-Kondensatoren angesprochen, daß gerade dieser wichtige Vorgang des Stromabfalles die verhältnismäßig lange Zeit von 10 min erfordert. Wenn man bedenkt, daß gerade der Reststrom der ersten Minute oftmals die Anwendung von Elektrolytkondensatoren in besonderen Relaisschaltungen ausschließt, so ist dies bei Ta-Kondensatoren erst recht der Fall.

Was nun die Größe des Reststromes anbetrifft, so ist dazu zu bemerken, daß es für einen Vergleich nicht zulässig ist, im Falle des Ta-Kondensators dessen gemessene Werte für 1 μF 150 V einzusetzen, für Al-Elektrolytkondensatoren dagegen den Wert nach Din 41 332 mit 0,5 μA · μF · V heranzuziehen. Vielmehr müssen auch für Al-Elektrolytkondensatoren die wirklich auftretenden Ströme eingesetzt werden.

Die in der Din-Vorschrift angeführten Reststromwerte sind nur Richtwerte, die noch dazu so weit gefaßt sind, daß selbst bei Schwankungen in den Material-

reinheiten immer noch von lieferbaren Kondensatoren gesprochen werden kann. In Wirklichkeit liegen die Reststromwerte der Al-Elektrolytkondensatoren weit unter den Din-Werten.

Für den richtigen Vergleich wurden zehn Al-Elektrolytkondensatoren 50 µF, 100/110 V der Fertigung des RFT-Kondensatorenwerkes Freiberg [illegible] und nach dreimonatiger spannungsloser Lagerung gemessen. Die auf [illegible] rechneten Werte sind neben denen der Ta-Kondensatoren im Bild 2 dar[illegible] zeigt sich dabei, daß mit Aluminium ebenso kleine Reststromwerte [illegible] sind wie mit Tantal.

Eine Bestätigung dessen stellen auch die in dem neuen Din-Entwurf [illegible] 230 aus dem Jahre 1954 für I_R angegebenen Werte dar, die der Vollständigkeit halber in Tafel 3 zusammengestellt sind. Auch bei diesen Werten handelt [illegible] selbstverständlich um Höchstwerte, der Normalfall wird darunterliegen.

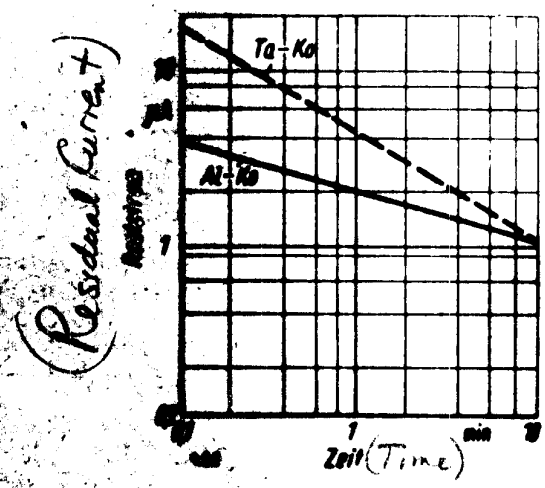


Bild 2. Reststrom von 1 µF Elektrolytkondensatoren mit Ta *und Al als Anode*

Um mit Aluminium die angegebenen niedrigen Ströme kleiner Kapazitäten zu erreichen, muß man besonderes Augenmerk auf die anodischen Stromzuführungen richten. Diese Stromzuführungen sind auch bei normalen Elektrolytkondensatoren die Quelle relativ hoher Ströme. So kann der Strom an den Stromzuführungen bisweilen ein Mehrfaches des im Kondensatorwickel selbst auftretenden Stromes ausmachen. Durch Verwendung reinsten Aluminiums an diesen Stellen läßt sich die genannte Störung jedoch vermeiden.

Dehnt man den Vergleich auf die Restströme je Flächeneinheit der Anoden aus, so ergibt sich ebenfalls kein besonderer Vorteil für Ta-Kondensatoren. Dies zeigt Tafel 4.

Auch in bezug auf die Temperaturabhängigkeit des Reststromes zeigt der Vergleich für Ta-Kondensatoren kein von Al-Elektrolytkondensatoren günstig abweichendes Verhalten. Vielmehr stimmt das Temperaturverhalten der Restströme beider Kondensatorentypen überein. Dies zeigt Bild 3.

4. Temperaturabhängigkeit

Hier ist zunächst der Arbeitstemperaturbereich der Ta-Kondensatoren interessant. Er beträgt für Ta-Wickel-Kondensatoren — 60° C bis + 80° C, in einigen Fällen + 90° C. Für sogenannte „Nasse" Ta-Kondensatoren ist sogar — 60° bis + 200° C angegeben.

Diese Daten gehen über den bei uns zur Zeit üblichen Temperaturbereich weit hinaus. Der Stand der Technik in Deutschland war 1945, mit Al-Elektrolytkondensatoren im Bereich — 60° bis + 70° C zu arbeiten.

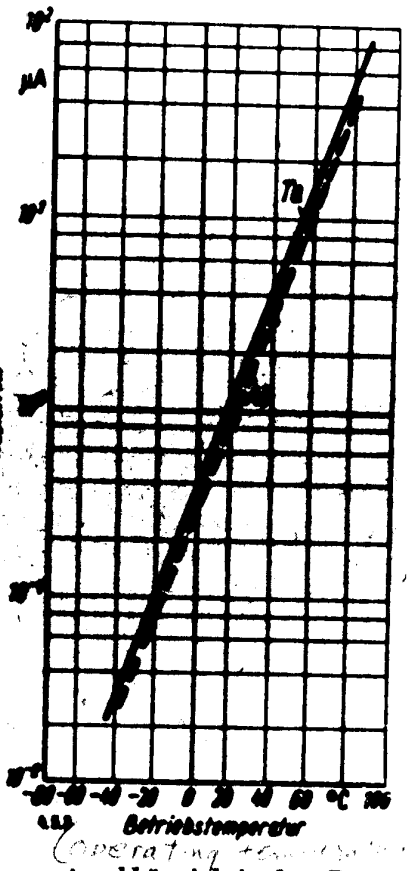


Bild 8. Vergleich der Temperaturabhängigkeit des Reststromes von Ta- und Al-Elektrolytkondensatoren

Die im Bereich —60° bis + 70° bei Ta-Kondensatoren auftretende Kapazitätsänderung ist wie bei Al-Elektrolytkondensatoren spannungsabhängig. Für höhere Spannungen ist der Kapazitätsabfall von + 20° bis — 60° C kleiner als bei kleinen Spannungen.

Für eine Arbeitsspannung von 30 V beträgt die Kapazitätsverminderung von Ta-Kondensatoren bei — 60° C 40 bis 50 %. Diese Kapazitätsänderung entspricht den in der deutschen Industrie seinerzeit für Al-Elektrolytkondensatoren zugelassenen Werten. Bei 200 C ist die Kapazität eines 30-V-Ta-Kondensators 30 bis 50 % größer als bei + 25 .

Die Möglichkeit der Zulassung einer Arbeitstemperatur oberhalb [illegible] läßt eine Überlegenheit der Ta-Kondensatoren erkennen, die in einigen Spezialfällen Bedeutung haben kann. Es ist kaum anzunehmen, daß so hohe Arbeitstemperaturen mit Aluminium jemals erreicht werden, weil Aluminium keine so hohe Korrosionsfestigkeit aufweist wie Tantal. Dem Ta-Kondensator [illegible] der Vorrang. Der Ta-Kondensator wird auch infolge der großen Korrosionsbeständigkeit des Tantals eine größere Lebensdauer aufweisen als der Elektrolytkondensator mit den derzeitigen Elektrolyten.

5. Frequenzabhängigkeit

Die Frequenzabhängigkeit der Elektrolytkondensatoren allgemein ist im Tonfrequenzbereich eine Frage der Leitfähigkeit des verwendeten Elektrolyten. Ein [illegible] kann nur mit Kondensatoren gleichen Arbeitstemperaturbereiches [illegible], dann nur dann werden annähernd gleiche Elektrolytleitfähigkeiten [illegible] der Ta-Kondensatoren auch für − 60° C vorgesehen sind, ist ein [illegible] mit in der DDR gebauten Kondensatoren nicht möglich. [illegible] aber bekannt, daß die Frequenzabhängigkeit von C_x, tg δ und [illegible] Elektrolytkondensatoren etwa den für Ta-Kondensatoren [illegible] entspricht. Das zeigt sich gut beim Vergleich der von [illegible] Serienwiderstand angegebenen Werte mit den von *Wachen-* [illegible] Daten von Al-Elektrolytkondensatoren.

[illegible] Frequenzabhängigkeit der Kapazität ist bei Ta-Kondensatoren nicht [illegible] unterschiedlich gegenüber den Al-Elektrolytkondensatoren. So ist [illegible] für Ta-Kondensatoren eine Kapazitätsänderung von 10 % im Bereich [illegible] Hz angegeben, während die Din-Vorschrift 41 230 für Al-Elektrolyt- [illegible] eine Änderung von 15 % anführt.

[illegible] Grund dieser Kenntnis ist nicht anzunehmen, daß die für Ta-Kondensatoren [illegible] Werte nicht auch von Al-Elektrolytkondensatoren eingehalten werden [illegible]

[illegible] mit den übrigen in der Technik verwendeten Metallen [illegible] ist sein Preis entsprechend hoch. Nach Angaben [illegible] kostet 1 kg Ta-Blech von 0,5 mm Dicke 411,71 DM. Mit [illegible] ergibt sich ein ungefähres Preisverhältnis von Al : Ta wie [illegible]. Hinzu kommt noch das hohe spezifische Gewicht des Tantals mit $\gamma = 16{,}65$. Aluminium dagegen mit $\gamma = 2{,}7$ wiegt nur $^1/_6$ des Tantals. Der echte Preisvergleich für gleich große Anodenflächen ergibt also: Al : Ta wie 1 : 600.

Durch diesen hohen Preis wird die Anwendung des Ta-Kondensators auf Spezialfälle beschränkt bleiben.

Zusammenfassung

Der sachliche Vergleich der Eigenschaften von Al-Elektrolytkondensatoren und Ta-Kondensatoren läßt in zwei Vergleichsfaktoren den Ta-Kondensator überlegen sein. Es sind dies die Arbeitstemperatur oberhalb 70° C, die sogar bis 200° C betragen soll, und die Korrosionsfestigkeit des Tantals selbst. Die übrigen

Eigenschaften der Ta-Kondensatoren lassen sich auch mit Al-Elektrolytkondensatoren erreichen. Der Arbeitsaufwand zur Erreichung dieses Zieles wird nicht größer sein als der, den eine Neuentwicklung von Ta-Kondensatoren erfordert, im Gegenteil. Der Weg, auf dem man schnell zu befriedigenden Abmessungen der Al-Elektrolytkondensatoren gelangt, ist durch die Kleinst-Al-Elektrolytkondensatoren des VEB Tonmechanik gezeigt. Es besteht noch die Aufgabe, diese Kleinst-Elektrolytkondensatoren für den größeren Temperaturbereich von — 60° bis + 70° geeignet zu machen.

Für diesem Zwecke müssen hochleitfähige Elektrolyten angesetzt werden. Dies ist [illegible] Aufgabe, die schon für andere, größere Kondensatorentypen, beispielsweise [illegible]-Kondensatoren, gestellt ist. Die Erkenntnisse dieser Entwicklungsarbeiten [illegible] Kleinst-Elektrolytkondensatoren ohne Mehrkostenaufwand zu. Es wäre [illegible], daß die für Ta-Kondensatoren im Arbeitsbereich größer als [illegible] zu entwickelnden Elektrolyten auch auf Ta-Kondensatoren [illegible] Arbeitstemperaturen allgemein übertragen werden könnten; denn [illegible] für hohe Arbeitstemperaturen haben bei Ta-Kondensatoren kleinere [illegible] als bei den Kondensatoren für niedrige Temperaturen. Niedrige [illegible] haben Verschlechterung der elektrischen Daten der [illegible] Folge.

[illegible] verschiedene Aufgaben für die Kondensatorentechnik:

[illegible] der Kleinst-Elektrolytkondensatoren mit Al-Elektroden in [illegible] — 60° bis + 70° C. Mit derartigen Kon- [illegible] 95 % der Anwendungsbereiche von Al-Elektrolytkon- [illegible] können, sowie die Konstruktion der Kleinst-Al-Elektro- [illegible] auch für hohe Spannungen einen raumgünstigen Aufbau [illegible]

[illegible] Kondensatoren für Betriebstemperaturen größer als 70°. Hierbei [illegible] unbedingt Tantal zu verwenden. Auch Wolfram, Molyb- [illegible] Metalle müssen berücksichtigt werden.

[illegible] noch feststellen, wie groß der echte Bedarf für Al-Elektrolytkon- [illegible] mit einer maximalen Arbeitstemperatur von größer als 70° bis 200°.

Tafeln zu Al-Elektrolyt- oder Ta-Kondensatoren

Tafel 1. Für 1 μF/150 V *erforderliche Anodenfläche*

Anodenmetall	Ta	Al_{glatt}	$Al_{rauh3.5}$
Anodenfläche, cm²	20	32	9

Tafel 2. Vergleich der Raumkapazitäten

Anodenmetall	Ta	$Al_{rauh3.5}$	$Al_{rauh4.1}$	Al_{rauh6}
Kapazität μF	50	10	11,7	17
Nennspannung V	25	25	25	25
Gehäuse mm	9,5 × 76	10 × 16	10 × 16	10 × 16
Volumen des Gehäuses cm³	5,4	1,25	1,25	1,25
Kapazitätsvolumen μF/cm³	9,25	8,0	9,25	13,7

Tafel 3. Reststromwerte für Al-Elektrolytkondensatoren laut DIN-Entwurf 41230, 1954

	U_N bis	$\leq$ 15 V	35 V	70 V	100 V
	0° C	0,15	0,24	1,0	2,0
I_R µA/µF Größtwert	+ 20°	0,25	0,5	2,0	4,0
nach 5 min	+ 50°	0,8	1,5	6,0	12
	+ 70°	1,8	2,6	10	20

Tafel 4. Vergleich der Restströme von Al-Elektrolyt- und Ta-Kondensatoren, + 20° C, bezogen auf 1 cm² Anodenfläche

Anodenmetall	Ta	Al
Reststrom · 10^{-6} A/cm² .	5,5	8,9
Isolationswiderstand MΩ/cm².	2700	[illegible]

Literatur

[1] [illegible], A., und [illegible], H.: Elektrolyt-Kond[illegible] 1957.

[2] [illegible] Capacitors. General [illegible]

[3] [illegible]

[4] [illegible]

25X1

Page Denied

Approved For Release 2008/02/07 : CIA-RDP83-00418R004000090001-6

25X1

5. Drahtnachrichtentechnik

5.1 Neue Erkenntnisse bei der Entwicklung von Trägerfrequenz-Leitungsverstärkern

Dipl.-Ing. *H. Kleiner*, Berlin

Die Trägerfrequenz-Leitungsverstärker stellen eine Gruppe von Verstärkern dar, die sich von allen anderen durch die besonderen Bedingungen, die an sie gestellt werden müssen, unterscheiden. Sie haben die Aufgabe, die Leitungsdämpfung der symmetrischen Fernkabel aufzuheben und die Spannungen der Fernsprechkanäle möglichst unverzerrt am Beginn jedes Verstärkerfeldabschnittes in der ursprünglichen Höhe herzustellen. Ihre Verstärkung beträgt etwa 7 bis 8 N. Dämpfungsschwankungen der gesamten Verbindung infolge von Spannungsschwankungen, Alterung und Steilheitsänderungen der Röhren müssen auf ein Mindestmaß beschränkt werden. Die an der natürlichen Nichtlinearität der Röhrenkennlinie entstehenden Oberwellen und Kombinationstöne müssen sehr klein gehalten werden, damit die vom CCIF am Ende einer Sprechverbindung zugelassene Störspannung von 2 mV am relativen Pegel Null nicht überschritten wird. Um die hierfür notwendige Linearität der Kennlinien zu erreichen, müssen die Leitungsverstärker mit einer sehr starken Gegenkopplung ausgerüstet werden. Die Typen der CCI-mäßigen Trägerfrequenzkabelsysteme sind in Tafel 1 zusammengestellt.

Tafel 1. Verstärkung, Sendepegel und Klirrdämpfung von TF-Systemen

TF-System	Frequenzbereich f [kHz]	Verstärkung s [N]	Kanalsendepegel p_s [N]	Aussteuerungsgrenze nach *Holbrook-Dixon* p_{max} [N]	Klirrdämpfung $a_{k_{20}}$ [N]	$a_{k_{20}}$ bei p_{max} [N]	Felddämpfung a_l [N]
V 12	12— 60	7,5	+ 0,5	+ 2,55	8,6	7,25	5,3
V 12/24	12—108	7,5	+ 0,5	+ 2,65	8,6	7,65 $f < 60$ 7,15 $f > 60$	6,3
V 24	60—156	7,5	+ 0,5	+ 2,65	10,0	7,15	7,5
V 60	60—300	7,5	+ 0,2	+ 2,45	10,0	7,35	5,1
V 60	12—252	7,5	+ 0,2	+ 2,45	10,5 $f < 60$ 10,0 $f > 60$	7,05	6,5
V 120	60—552	7,5	+ 0	+ 2,35	10,0	> 7,45	6,5

[illegible]

[illegible] Parallelkapazitäten.

[illegible] Gegenkopplung ist mit einer Phasendrehung über die Gegenk[illegible] verbunden, die die Stabilität des Verstärkers in weiten Bereichen [illegible]. Eine ausreichende Stabilität auch bei Zulassung von Fertigungsstreuungen herzustellen, ist Aufgabe des Entwicklers.

Der klassische Berechnungsgang stark gegengekoppelter Verstärker, wie er insbesondere von *Bode* [2] ausführlich beschrieben wurde, geht vom nichtgegengekoppelten Verstärker aus, dessen Eingang zusätzlich Teile der Ausgangsspannung über ein lineares Gegenkopplungsnetzwerk zugeführt werden (Bild 1).

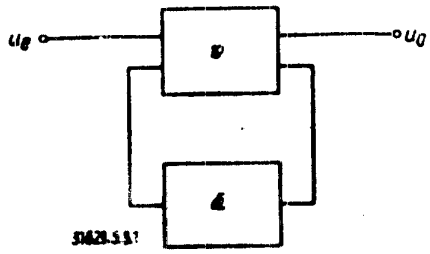


Bild 1. Gegengekoppelter Verstärker

Im Übertragungsbereich beträgt die Phasendrehung zwischen u_e und u_r nahezu 180°, und es gilt die Beziehung für die resultierende Verstärkung $\mathfrak{v}'$, wenn $\mathfrak{v}$ die Verstärkung ohne Gegenkopplung ist,

$$\mathfrak{v}' = \mathfrak{v}\,\frac{1}{1+\mathfrak{K}\mathfrak{v}}.$$

Die Eigenschaften linearer Netzwerke, die im Gegenkopplungsweg angewendet werden können, um den gewünschten frequenzabhängigen Verstärkungsgang zu erzielen, sind in der Literatur eingehend behandelt. Bei der Entwicklung sind die Netzwerke so zu wählen, daß die bekannte Stab[illegible] *Nyquist* [1] erfüllt ist.

Die Anpassung des Verstärkers an den Kabel[illegible] die Klirrdämpfung und andere Bedingungen bestimmen die Wahl der Gegenkopplungsschaltung, die eine Sache der Erfahrung des Entwicklers ist.

Ist das Gegenkopplungsnetzwerk gefunden, das diesen Bedingungen genügt, dann wird durch Messung der Übertragungscharakteristik der Gegenkopplungsschleife geprüft, ob die Stabilitätsbedingung eingehalten ist.

Dieses bisher gebräuchliche Verfahren ist insofern unbefriedigend, als nach Finden einer Lösung für eine Verstärkeraufgabe die Frage offen bleibt, ob diese Lösung die optimale ist oder eine andere denkbar ist, die günstigere Eigenschaften hat. Es ist aus diesem Grunde von *Bader* [3] die Frage gestellt worden, wie äußere Verstärkung eines gegengekoppelten Verstärkers beschrieben werden muß, damit bei gegebener Grundverstärkung das Gegenkopplungsnetzwerk optimale Eigenschaften entwickelt, wobei die Schaltungsbedingungen [illegible] bei Gegenkopplungen nur bestimmten Betrachtungsweisen [illegible] dieser Auffassung [illegible] des Netzwerkes [illegible]

wird der gegengekoppelte Verstärker in die allgemeine Theorie linearer Netzwerke als ein Sonderfall eingegliedert, der aktive Elemente enthält. Diese exakte Betrachtungsweise schließt alle Möglichkeiten von Gegenkopplungsschaltungen ein.

Sie ist anwendbar, wenn eine Funktion für die äußere Verstärkung des gegengekoppelten Verstärkers angegeben werden kann, und ist mit dieser allgemein gültigen mathematischen Formulierung dem bisherigen Verfahren einer experimentellen Zusammenfügung von Netzwerken überlegen, da nur auf diesem Wege die Frage nach der optimalen Lösung eindeutig beantwortet werden kann.

Wenn die innere Verstärkung nach Bild 2 durch ein Transformationsnetzwerk T dargestellt wird, das diese im Übertragungsfrequenzbereich nicht verändert, läßt sich die äußere Verstärkung $\mathfrak{v}'$ als Funktion der komplexen Frequenz $j\omega = p$ schreiben, die zu einer inneren Verstärkung $\mathfrak{v}$ gehört, wenn diese ebenfalls als Funktion der komplexen Frequenz $j\omega$ gegeben ist. Die äußere Verstärkung für die Schaltung nach Bild 3 wird

$$\mathfrak{v}' = \frac{\mathfrak{v}\,T}{1 + \mathfrak{v}\,T\,\mathfrak{K}}.$$

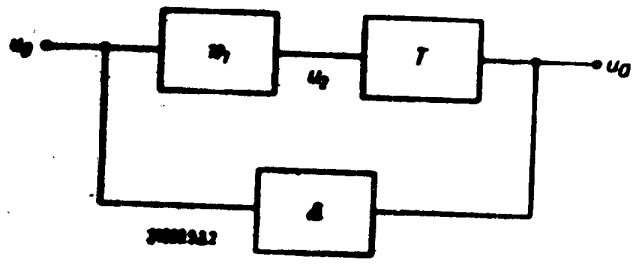


Bild 2. Gegengekoppelter Verstärker nach Bader

Die Funktion $\mathfrak{v}'(p)$ ist geeignet, die Frage nach der Erfüllung des Stabilitätskriteriums mathematisch zu beantworten. Die innere und äußere Verstärkung und das Gegenkopplungs- und Transformationsnetzwerk werden als reelle, rationale Funktionen von p in der Form eines Verhältnisses von zwei Polynomen mit reellen Koeffizienten dargestellt. Für die Verteilung der Nullstellen und Pole in der p-Ebene ergeben sich bestimmte Bedingungen, die von einem stabilen Verstärker eingehalten werden müssen.

Der Gegenkopplungsfaktor $\gamma = 1 + \mathfrak{K}\mathfrak{v}$ kann beispielsweise in der Form geschrieben werden

$$\gamma = A \cdot \frac{(p - p_1)\,(p - p_2) \cdots (p - p_n)}{(p - p_1')\,(p - p_2') \cdots (p - p_n')}.$$

Die Nullstellen der Funktion ergeben sich durch Nullsetzen des Zählers, während die Funktion für die Nullstellen des Nenners Pole aufweist. Die Pole sind die Stellen der Funktion, an denen der Verstärker schwingt. Bei positivem Vorzeichen von p wachsen die Schwingungen an, während sie bei negativem p abklingen. Soll der Verstärker stabil sein und die Anfachung von Schwingungen unmöglich, so darf die Funktion keine Pole in der rechten p-Halbebene, d. h. bei positiven Werten von p, aufweisen. $\mathfrak{v}$ und $\mathfrak{K}$ besitzen zwangsläufig keine Pole in der rechten p-Halbebene, weshalb dort auch Pole von γ nicht existieren können. Die Stabilität

eines Verstärkers ist danach lediglich durch die Bedingung gewährleistet, daß γ keine Pole und Nullstellen in der positiven Halbebene besitzt.

Diese Bedingung ist mit dem von *Nyquist* [1] formulierten Kriterium identisch, wonach die $\mathfrak{V}\mathfrak{N}$-Kurve den Punkt (1,0) nicht einschließen darf.

Das vorstehend erläuterte Verfahren läßt sich immer dann anwenden, wenn die gesamte Verstärkung eines Verstärkers als Bruch von 2 Polynomen mit reellen Koeffizienten von p dargestellt werden kann.

Ein n-stufiger nichtgegengekoppelter Verstärker mit Koppelgliedern zwischen den einzelnen Stufen und Parallelkapazitäten zu den Außenwiderständen, dessen Verstärkung bei tiefen und hohen Frequenzen mit einer Steilheit abfällt, die bei gleicher Grenzfrequenz der Koppelglieder 2,1 N Oktave beträgt, ist durch die Gleichung gekennzeichnet

$$\mathfrak{v}' = \frac{\mathfrak{v}}{\left[1 + \frac{\omega_u}{\omega_0} + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_u}{\omega}\right)\right]^n}.$$

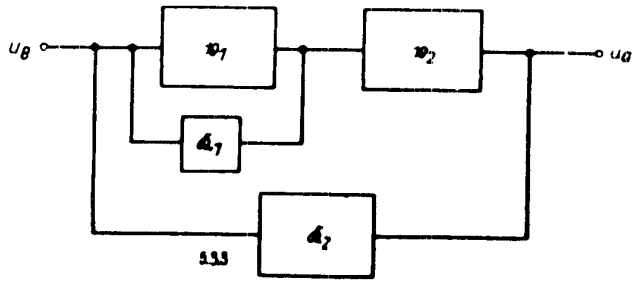


Bild 3. Zweistufiger Verstärker mit 2 Gegenkopplungswegen

Die Nullstellen des Nenners liefern wieder die Pole von $\mathfrak{v}'$, bei denen der Verstärker schwingen würde. Diese dürfen nicht bei positiven Werten von p liegen. Bei Staffelung der Koppelglieder wird der Nenner in ein Produkt von Klammerausdrücken der vorstehenden Art verwandelt. Wenn $\mathfrak{v}'$ stabil sein soll, gilt die gleiche Bedingung, daß der Nenner keine Nullstelle in der positiven Halbebene besitzt.

In der gleichen Weise läßt sich die Stabilitätsbedingung für einen Verstärker, der mehrere Gegenkopplungswege enthält, formulieren. Beispielsweise sei ein zweistufiger Verstärker mit zwei Gegenkopplungen betrachtet, wie er in Bild 3 schematisch dargestellt ist.

Mit den Bezeichnungen nach Bild 4 wird

$$\mathfrak{v}' = \frac{\mathfrak{v}_1 \mathfrak{v}_2}{1 + \mathfrak{N}_1 \mathfrak{v}_1 + \mathfrak{N}_2 \mathfrak{v}_1 \mathfrak{v}_2}.$$

Auch dieser Verstärker ist stabil, wenn der Nenner des vorstehenden Ausdrucks keine Nullstellen in der positiven Halbebene aufweist. In der gleichen Weise läßt sich der Ansatz für drei- und mehrstufige Verstärker zu machen, für die die Frage nach der Stabilität überhaupt erst von Bedeutung ist. Für mehrstufige Verstärker mit mehreren Gegenkopplungswegen hat *Cutteridge* [8] diese Betrachtung durchgeführt.

Nach dem Vorstehenden läßt sich für alle Verstärker mit beliebigen Koppelgliedern und Gegenkopplungswegen die Stabilitätsbedingung eindeutig mathematisch formulieren, sofern ihre äußere Verstärkung als Bruch zweier Polynome geschrieben werden kann.

Neben der Stabilitätsbedingung interessiert den Entwickler die Frage nach Bemessungsregeln für die anzuwendenden Gegenkopplungsnetzwerke, die sich aus den Funktionen für $\mathfrak{v}$ und $\mathfrak{v}'$ ergeben.

Aus ihnen lassen sich mit Hilfe der Funktionentheorie die Bedingungen für die Funktionen ableiten, denen das Gegenkopplungs- und Transformationsnetzwerk genügen muß, wenn alle Forderungen, die an den Verstärker gestellt werden, erfüllt sein sollen. Dazu ist es notwendig, zusätzliche Bedingungen über die für $\mathfrak{v}$ und $\mathfrak{v}'$ bereits bestehenden hinaus aufzustellen. Zunächst werden die Größen $\mathfrak{v}$, $\mathfrak{v}'$, $\mathfrak{R}$ und T durch die in der Schaltung herrschenden Spannungsverhältnisse definiert und für $\mathfrak{v}$ oder ihre Reziproken der Bereich p, in dem Pole oder Nullstellen auftreten können, bestimmt, weil bei einem linearen Netzwerk, das sich nicht selbst erregen kann, das Verhältnis der Ausgangsspannung zur Eingangsspannung eine rationale Funktion von p sein muß, die für reelle p reell ist und nur in der linken p-Halbebene Nullstellen besitzen kann.

Die genannten Größen werden als rationale Funktionen von p dargestellt, die [illegible] Bedingungen erfüllen müssen wie beispielsweise diejenige für das Transformationsnetzwerk $\mathfrak{T}$, die für den Betrag von $T(p)$ im Übertragungsbereich [illegible] fordert, da $\mathfrak{v}$ in diesem Bereich durch T nicht beeinflußt werden soll. Der Unempfindlichkeitsbeiwert der äußeren Verstärkung $\mathfrak{v}'$ gegenüber Schwankungen der inneren Verstärkung $\mathfrak{v}$ ergibt eine Bedingung für die Größe der Gegenkopplung, die den vorgeschriebenen Verstärkungsgang $\mathfrak{v}'$ auch bei Schwankungen von $\mathfrak{v}$ gewährleisten muß.

Es würde den vorgegebenen Rahmen übersteigen, hier alle möglichen Bedingungen für die genannten vier Größen näher zu behandeln. Auch werden diese Bedingungen von Fall zu Fall gewisse Unterschiede aufweisen. Sie sind von *Bader* [4] und [5] formuliert worden. Es ist auf dem angedeuteten Wege möglich, in jedem Falle mathematisch eindeutige Lösungen für die Bemessung der Transformations- und Gegenkopplungsnetzwerke zu finden.

Jedoch gelingt es nicht immer, auf diesem Wege zu Schaltungen mit minimalem Aufwand zu gelangen, wie sie der Entwicklungsingenieur anstrebt. Daher wird es sich in der Praxis empfehlen, die Parameter der für die Netzwerke einzuführenden Hilfsfunktion frei zu wählen und ihre Verträglichkeit mit der aufgestellten Funktion zu prüfen.

In der Praxis der Verstärkerbemessung treten bei dem vorliegenden Verfahren Schwierigkeiten auf, auf die hier hingewiesen sei. Die innere Verstärkung eines Verstärkers ist abhängig von Schwankungen der Betriebsspannungen, Alterung der Röhren und Toleranzen in den Werten der Schaltteile. Diese Einflüsse sind ebenso wie die Nichtlinearität der Röhren in der skizzierten Funktionsdarstellung nicht berücksichtigt.

Der auf diese Weise gewonnene Gang der äußeren Verstärkung enthält noch keine Sicherheit für die erreichte Stabilität gegenüber Schwankungen der inneren Verstärkung, die durch die genannten Einflüsse hervorgerufen werden.

Insbesondere darf nicht außer acht gelassen werden, daß in der Praxis die Stabilität solcher Verstärker durch parasitäre Eigenschaften einzelner Schaltteile

entscheidend beeinflußt wird, wobei die Übertrager eine besondere Rolle spielen. Deren Eigenschaften entziehen sich im allgemeinen der exakten Messung und stellen daher einen erheblichen Unsicherheitsfaktor in der Rechnung dar.

Wenn man die Ergebnisse der Auslegung von Verstärkern nach den bisher bekannten Verfahren einer Kontrolle durch das exakte mathematische Verfahren unterwirft, erweist sich die geschilderte Theorie als fruchtbringend.

Nach der Behandlung der theoretischen Berechnungsgrundlagen seien im folgenden einige Punkte herausgestellt, die sich bei der Entwicklung solcher Verstärker als bedeutungsvoll erwiesen haben und deren Beachtung den Spielraum aller möglichen Schaltungen einengt.

Wir sahen oben, daß die Klirrdämpfung einen bestimmenden Einfluß auf die Bemessung hat. Eine Verringerung der Gegenkopplung kann man dadurch erreichen, daß die Klirrdämpfungsforderung über den Nutzfrequenzbereich gestaffelt

Bild 4. TF-L[illegible]

wird, wobei man davon ausgeht, daß die [illegible] der Form $2f_1-f_2$, die mit der doppelten Amplitude der zweiten [illegible], für die Größe der nichtlinearen Störungen maßgebend sind. [illegible] aber die Modulationsprodukte, soweit sie aus den oberen Kanälen stammen, zu einem großen Teil außerhalb des Übertragungsbereichs, weshalb eine Verringerung der Gegenkopplung für den oberen Frequenzbereich, bei dem die innere Verstärkung bereits abfällt, zulässig erscheint. Weiterhin ist es zweckmäßig, die [illegible]rung des Kabelabschnitts zu einem beträchtlichen Teil in den G[illegible] legen, da man dadurch eine höhere Klirrdämpfung für den t[illegible] erzielt, bei dem sie besonders wichtig ist.

Zugleich wird durch diese Maßnahme die Rauschdämpfung [illegible] Frequenzen erhöht, da die Rauschspannungen im ursprüngl[illegible] Eingang des Verstärkers gelangen und nicht mit einem um [illegible] verminderten Abstand, wie dies beim vorgeschalteten Vierpol [illegible]

Ein Optimum der Unabhängigkeit der gegengekoppelten Sch[illegible] [illegible] der Betriebsspannungen wird beispielsweise erreicht, w[illegible] [illegible]ierten Gegenkopplungswege möglichst bis auf einen einzigen, der über alle [illegible]führt wird, vermindert werden kann. Jedoch wird aus anderen Gründen, [illegible]teilung der Klirrdämpfung der einzelnen Stufen und der Verringerung [illegible]aufwandes, dieses Ziel nicht ganz erreicht werden können.

Unter Annahme einer quadratischen Kennlinie besteht eine Proportionalität zwischen der Erhöhung der Gegenkopplung und der Klirrdämpfung für die zweite Harmonische, wobei auch hier eine starke Gegenkopplung über alle Stufen das Optimum ergibt, sofern nicht durch Begrenzung im Gitter oder Aussteuerung in den Knick einer Kennlinie eine weitere Erhöhung der Klirrdämpfung unmöglich wird.

Trotz der Kapazitäten und Streuinduktivitäten der Übertrager, die zu Phasenverzerrungen im Gegenkopplungsweg Anlaß geben und somit Instabilität bewirken können, wird der Entwickler nicht auf Übertrager verzichten können. Es ist

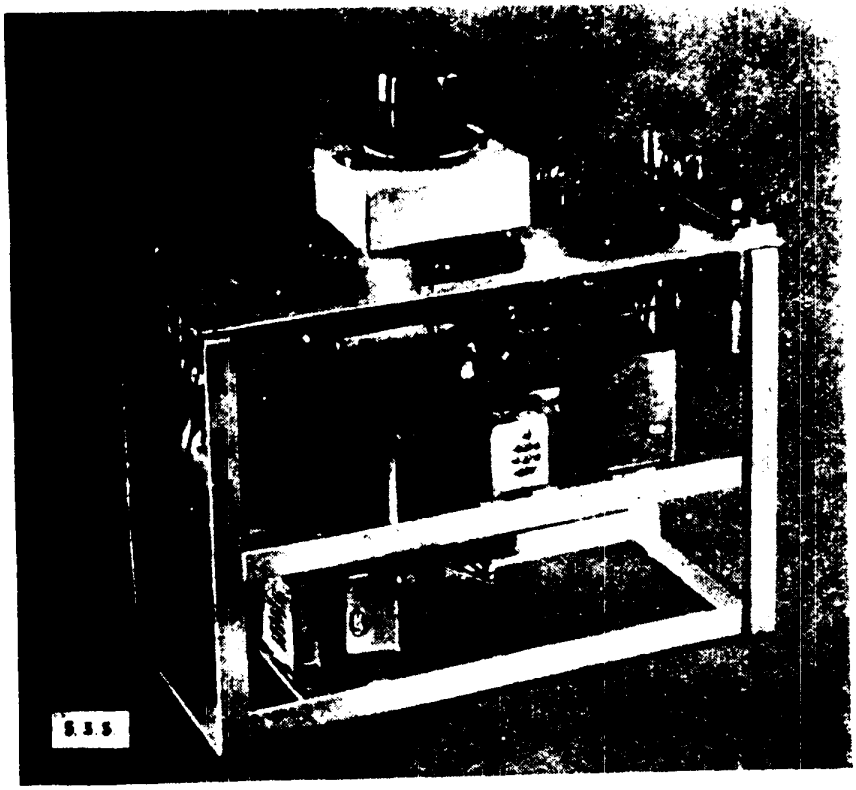


Bild 5. TF-Leitungsverstärker V 12 24, Ausf. 2

gegebenenfalls nötig, durch Einfügen von phasendrehenden Netzwerken im Gegenkopplungsweg die Instabilität zu beseitigen.

Die Bilder 4 und 5 zeigen die Ansicht von zwei Trägerfrequenzverstärkern.

Bild 4 stellt das Entwicklungsmuster eines V-12 24-Verstärkers für einen Frequenzbereich von 12 bis 120 kHz mit einer Verstärkung von 8 N dar, wie er von der Industrie in einer konstruktiv abgeänderten Form seit längerer Zeit gefertigt wird. Der 3stufige Verstärker ist für die bisher bei der Post übliche Gestellbauweise entworfen und mit technischen Rohren der Type 6 AC 7 (k) und 6 AG 7 (k) bestückt. Die Verstärkerschaltung ist bei dieser Ausführung in mehrere Baueinheiten aufgeteilt, die jeweils den Röhrenteil, den im Gegenkopplungsweg befindlichen Stufenregler, das Gegenkopplungsnetzwerk und die Siebschaltung für eine Betriebs-

spannungen enthalten. Durch diese Aufteilung ergibt sich eine umfangreiche Ver-
drahtung zwischen den elektrisch einander zugehörigen Baueinheiten, die d
Empfindlichkeit des Verstärkers gegenüber Ausführungsunterschieden in d
Fertigung und deren Einfluß auf die Stabilität erhöht.

Bild 5 zeigt einen Verstärker der Ausführung 2 für 12/24-Kanäle im Frequ
bereich 12 bis 160 kHz mit einer Verstärkung von 7,8 N. Er ist konstruktiv für

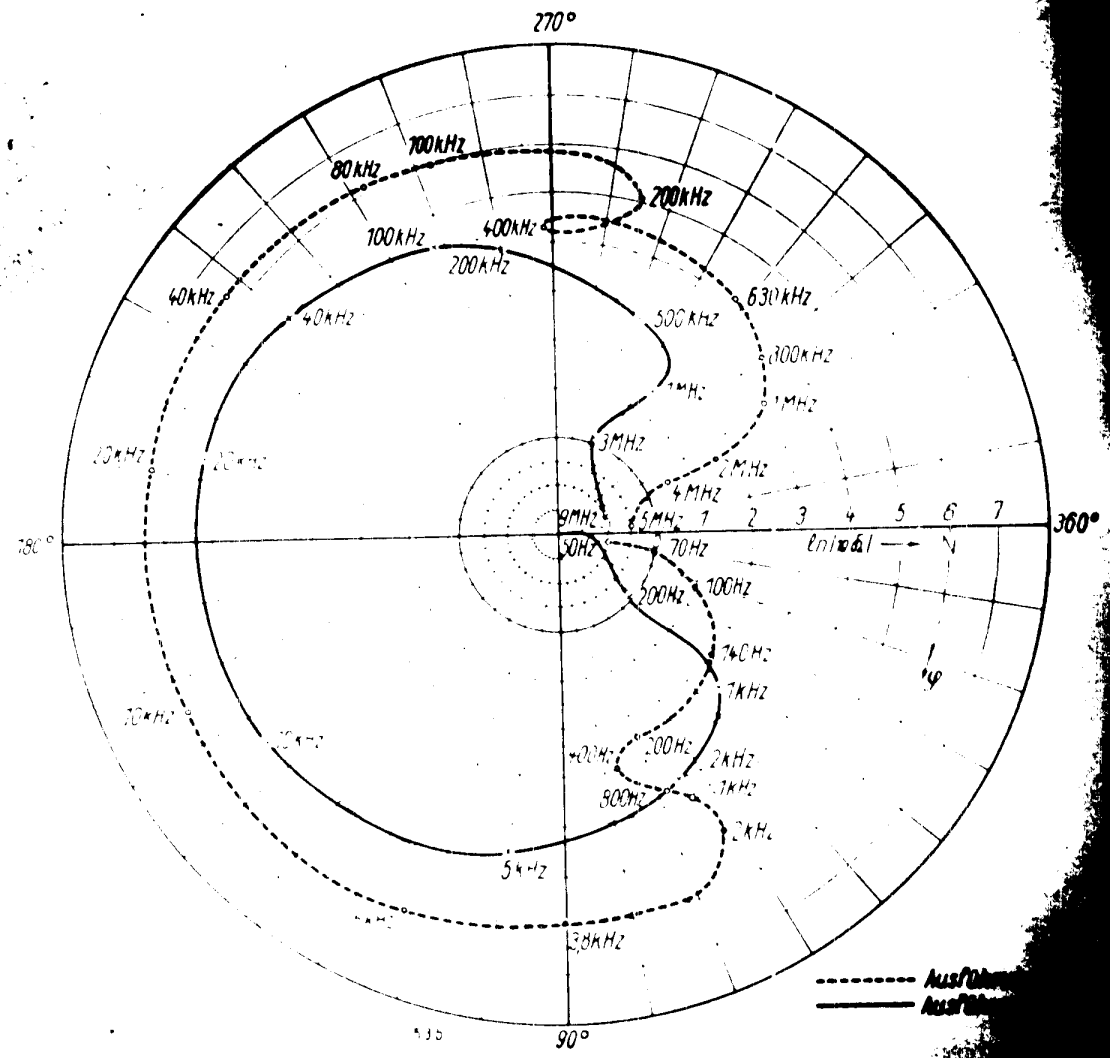


*Bild 6. TF-Leitungsverstärker V 12/24. Übertragungscharakteristik
Gegenkopplungsschleife*

Schrankbauweise entwickelt, wie sie für die Trägerfrequenzsysteme der
der letzten Zeit vorgesehen ist. Die Röhrenbestückung ist die gleiche wie
vorbeschriebenen Ausführung 1.

Bild 5 vermittelt einen Eindruck von der erheblichen Verminderung des
wandes an Schaltteilen, und man erkennt die zweckmäßige Zusammenfas
elektrisch zusammengehöriger Teile in einer Baueinheit, im Gegensatz zu der A

25X1

teilung des Verstärkers in der Ausführung 1. Die Vereinfachung der Verdrahtung wirkt sich in einer Verbesserung der Stabilität aus.

Bild 6 zeigt das Übertragungsmaß der Gegenkopplungsschleife der beiden Verstärker. Man erkennt, wie die Phasendrehung über die Gegenkopplungsschleife bei der in Bild 5 gezeigten Ausführung 2 gegenüber der älteren Ausführung 1 entscheidend verbessert werden konnte und die Neigung der Kurve zur Schleifenbildung bei tiefen und hohen Frequenzen unterbunden ist. Trotz der in Bild 6 erkennbaren Verringerung des Betrages der Gegenkopplung $\ln |\mathfrak{v}\mathfrak{R}|$ konnte bei der Ausführung 2 durch geeignete Bemessung die erreichte Klirrdämpfung gegenüber der Ausführung 1 noch erhöht werden.

Die im vorstehenden einzeln behandelten Gesichtspunkte finden zur Zeit bei der Entwicklung von Leitungsverstärkern für Trägerfrequenzsysteme mit hohen Kanalzahlen Anwendung.

Den Postbehörden als Auftraggeber sei an dieser Stelle für Anregungen und Hinweise gedankt, besonders für die Unterstützung der Entwicklung durch Auswertung der Betriebserfahrungen und bei der Aufstellung der Pflichtenhefte.

Literatur

[1] *Nyquist, H.:* Regeneration Theory. Bell Syst. Techn. J. Vol. XI (1932) 126.

[2] *Bode, H. W.:* Network and Feedback Amplifier Design. 7. Aufl. New York: van Nostrand Cy 1951.

[3] *Rowlands:* Harmonic Distortion and Negative Feedback. Wireless Engr. Vol. 30 (1953) 133.

[4] *Bader, W.:* Rationale Gegenkopplungs- und Entzerrungsschaltungen oder Folgeregler mit vorgeschriebenen Eigenschaften. A.E.Ü. 8 (1954) H. 7, S. 295.

[5] *Bader, W.:* Polynomvierpole mit gegebener Verlusten und vorgeschriebener Frequenzabhängigkeit. Arch. Elektrotechnik 36 (1942) 97.

[6] *Knopp, K.:* Funktionentheorie. Sammlung Göschen Bd. 668.

[7] *Peters, H.:* Einschwingvorgänge, Gegenkopplung, Stabilität. Springer-Verlag, Berlin 1954.

[8] *Cutteridge, O. P. D.:* Multiloop Feedback Amplifiers. Wireless Engr. Vol. 31 (1954) H. 11, 293.

6. Energieversorgung und Verteilung

6.1 Perspektiven der Entwicklung der Elektroenergiewirtschaft

Dr.-Ing. W. *Schwarz*, Berlin

1. Einleitung — Entwicklung bis 1955

Die hinter uns liegenden zehn Jahre erfolgreichen Aufbaus in der Deutschen Demokratischen Republik wären undenkbar ohne eine entsprechende Entwicklung der Elektroenergiewirtschaft. Auf über 200% insgesamt steigt mit Ablauf des ersten Fünfjahrplans die Erzeugung an elektrischer Arbeit im Vergleich zu 1936 an, nachdem sie 1945 auf etwa 50% dieses Standes abgesunken war (Bild 1).

Die modernsten Kraftwerksanlagen fielen Kriegseinwirkungen zum Opfer. Die fahrbare Leistung der nach dem Zusammenbruch des faschistischen Regimes verbliebenen Kraftwerksanlagen (überwiegend veraltete Mitteldruckanlagen) wurde auf weit über das Doppelte gegenüber 1945 gesteigert. Die neu installierte Leistung betrug im Zeitraum des ersten Fünfjahrplans 25% (Bild 2). Der Anstieg der Erzeugungsbasis wurde bis 1953 im wesentlichen durch Beseitigung von Engpässen vor allem auf der Dampfseite, und Mobilisieren stilliegender, auch unwirtlicher Reserven erreicht. Erst das vergangene Jahr brachte uns einen von 16% der fahrbaren Leistung durch Neubauten, nachdem mit der der Schwerindustrie und des Energiemaschinenbaues in der Deutschen Demokratischen Republik die Voraussetzungen geschaffen waren. Ein Zuwachs in [illegible]cher Höhe in diesem Jahr wird dazu beitragen, Disproportionen zwischen Erzeugung und Bedarf unserer sich rasch entwickelnden Industrie zu [illegible], nachdem die abschaltfreie Versorgung der Bevölkerung seit dem [illegible] gültig gesichert ist. Die stellere Entwicklung der erzeugten [illegible] Vergleich zur fahrbaren Leistung ist der Ausdruck für die [illegible] der Kapazitäten durch Senkung der Stillstandszeiten durch [illegible] Neuerer und Aktivisten mit unseren Nationalpreisträgern [illegible] der Spitze. Die Benutzungsstunden der fahrbaren Leistung [illegible] werke auf Grubenbasis sind von 5000 h 1945 auf [illegible] angestiegen. In Westdeutschland betragen sie im Mittel für die [illegible] 1954 4700 h gegen 5600 h in der Deutschen Demokratischen [illegible]

2. Aufgabenstellung für die weitere Entwicklung

Im Rahmen dieses Vortrages soll nicht der Perspektivplan der [illegible] wirtschaft erläutert werden. Es sollen vielmehr ein Überblick [illegible] Darstellung bestimmter Probleme Anregungen zur Vertiefung der [illegible] wissenschaftlichen Zusammenarbeit der Fachkollegen der verschiedenen [illegible]

Lösung der vor uns liegenden Aufgaben beteiligten Industriezweige und wissenschaftlichen Institutionen gegeben werden. Dabei wird die bei der Aufstellung der Pläne bereits durchgeführte Koordinierung vorausgesetzt. Die bei der Realisierung des Energieprogramms 1954 erzielten Leistungen können für uns noch kein Anlaß zur Selbstzufriedenheit sein. Die Elektroenergiewirtschaft muß im zweiten Fünfjahrplan in ihrer Entwicklung einen *Vorlauf* gegenüber anderen Industriezweigen

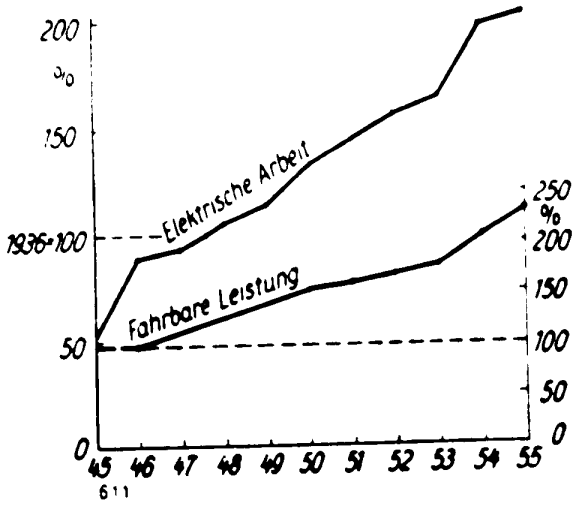


Bild 1. Elektrische Arbeit und fahrbare Leistung der DDR

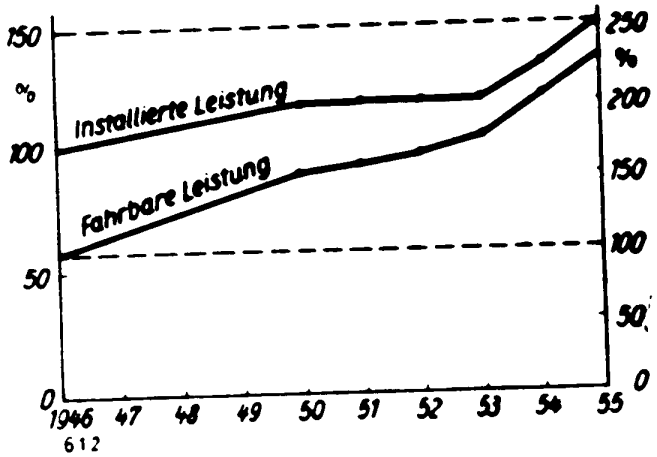


Bild 2. Installierte und fahrbare Kraftwerksleistung der DDR

als Voraussetzung für die Befriedigung der ständig wachsenden Bedürfnisse erringen. Kam es in der zurückliegenden Zeit darauf an, überhaupt neue Kapazitäten zu bauen, so besteht jetzt die Aufgabe darin, den Leistungszugang mit dem höchsten volkswirtschaftlichen Effekt zu sichern, d. h., vor allem durch Anwendung höchstentwickelter Technik die vorhandenen Energiequellen besser auszunutzen. Die im ersten Fünfjahrplan bereitgestellten Investitionsmittel für die öffentlichen Elektroenergieversorgungsanlagen sind bis heute auf etwa das Fünffache angestiegen. Aus Bild 3 ist zu ersehen, daß zunächst die Entwicklung der Kraftwerke

forciert wurde, während in den Übertragungs- und Verteilungsanlagen Reserven vorhanden waren, die es auszunutzen galt. Im zweiten Fünfjahrplan sind zusätzlich zur weiteren Entwicklung der Kraftwerke die Netze zu rekonstruieren, um die sichere Belieferung des letzten Abnehmers mit Elektroenergie zu garantieren.

Als Schwerpunkte sind folgende Aufgaben besonders hervorzuheben:

2.1 Inbetriebnahme neuer Kapazitäten,

2.2 Verbesserung des energetischen Wirkungsgrades bzw. Senkung der Verluste,

2.3 Deckung des Spitzen- und Blindleistungsbedarfs,

2.4 Aufbau des 220-kV-Verbundnetzes,

2.5 Rekonstruktion der Verteilungsnetze.

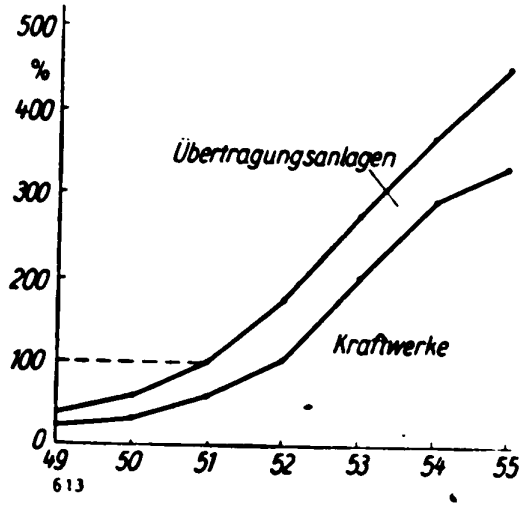


Bild 3. Bereitgestellte Investitionsmittel für öffentliche Elektroenergieversorgungsanlagen

8. Entwicklung der Kraftwerke

Die Steigerung der Elektroenergieerzeugung der Deutschen Demokratischen Republik hängt entscheidend ab von der Ausnutzung der für die Kraftwerke zur Verfügung stehenden Menge des wichtigsten Energieträgers, der Braunkohle. Eingesetzt wird in den neuen, auf Kohlenfeldern zu errichtenden Großkraftwerken ballastreiche Kohle mit geringerem Heizwert. Die bessere Kohle bleibt als Rohstoff unserer Kohleveredlungs- und chemischen Industrie vorbehalten. Die Verbesserung des energetischen Wirkungsgrades in den Kondensationswerken erfordert Übergang zu höheren Drücken, Temperaturen und größeren Maschineneinheiten. Das Kraftwerk Elbe mit Kesseln 160 t/h, 84 atü Genehmigungsdruck, 500° C und 32-MW-Turbosätzen ist heute unser modernstes Kondensationswerk. Die ersten 132-atü-Kesselanlagen sind bereits im Bau, um im nächsten Jahr, dem ersten Jahr des zweiten Fünfjahrplans, mit 75-MW-Zweiwellenturbosätzen in Betrieb zu gehen.

Die nächste Stufe sind 200-atü-Hochstdruckanlagen mit Einwellenturbosätzen und wasserstoffgekühlten Generatoren. Ende des zweiten Fünfjahrplans soll mit Hilfe der Sowjetunion diese technische Stufe erreicht sein.

Damit sinkt der spezifische Wärmeverbrauch für die erzeugte kWh, bezogen auf Generatorklemmenleistung, im Vergleich zum Kraftwerk Elbe um rd. 15%, im Vergleich zum Mittel der öffentlichen Kraftwerke sogar um rd. 45%. Unsere alten Mitteldruck-Großkraftwerke erhalten 132-atü-Vorschaltanlagen, womit eine Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades von etwa 30 bis 35% erreicht wird.

So groß relativ die erreichte Verbesserung ist, so niedrig bleibt doch der thermische Wirkungsgrad, absolut gesehen, auch bei der besten Kondensationsanlage, weil die gesamte, dem Kondensatordruck entsprechende Erzeugungswärme des Dampfes an das Kühlwasser abgegeben wird und mit diesem verlorengeht. Es gilt deshalb, alle Möglichkeiten zur Kraft-Wärme-Kupplung auszunutzen, d. h., die für Heiz- oder Produktionszwecke benötigte Wärme in Form der Verdampfungs- und Flüssigkeitswärme von Heizdampf niedriger oder mittlerer Spannung, gegebenenfalls über Wärmeaustauscher — zu verwenden, nachdem bei der Ent-

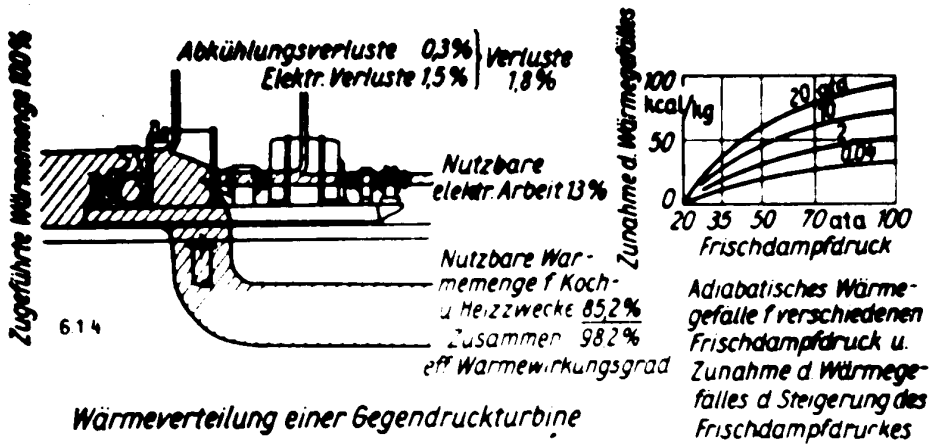


Bild 4. Wärme-Kraft-Kupplung

spannung in der Turbine auf den Gegendruck Arbeit geleistet wurde. Selbst kleine Anlagen haben bei einem spezifischen Wärmeverbrauch von etwa 1100 kcal/kWh die gleiche Wirtschaftlichkeit wie Großkraftwerke, eine angemessene Benutzungsdauer selbstverständlich vorausgesetzt (Bild 4).

Es ist wichtig, bei der Auslegung den Gegendruck so niedrig wie möglich zu halten, denn aus dem i, s-Diagramm ist zu entnehmen, daß eine Senkung des Gegendruckes von 2 auf 1 ata theoretisch den gleichen Leistungsgewinn wie die Steigerung des Frischdampfdruckes von 20 auf 70 ata bringt, eine Tatsache, die bei vielen Planungen nicht beachtet wird.

In den nächsten Jahren sind neben Industrieanlagen Heizkraftwerke zur Wärmeversorgung vor allem in unseren im Aufbau befindlichen Industriezentren vorzusehen. Neben den dadurch erreichten sozialen und [illegible] Vorteilen werden große Mengen hochwertiger Brennstoffe, besonders [illegible] andere Verwendungszwecke frei.

Schwierige Probleme sind bei der Verwendung der Salzkohle zu lösen. Die Deutsche Demokratische Republik verfügt bekanntlich über beachtliche [illegible] mit einem Heizwert von etwa 2500 kcal/kg. Parallel zur Entwicklung des Braunkohlekessels wird die Vergasung der Salzkohle vorangetrieben. [illegible] Einsatz von Gas als Energieträger an Stelle von Kohle in Heiz- und [illegible]

kraftwerken bereits in die Perspektiven des dritten Fünfjahrplans gehört, so zeigt doch gerade dieses Beispiel, daß Fragen der Energiewirtschaft nie losgelöst voneinander behandelt werden dürfen, um in der jeweiligen Situation die volkswirtschaftlich beste Lösung zu finden.

4. Spitzen- und Blindleistungsdeckung

Der Vergleich der Tagesbelastungskurven der Deutschen Demokratischen Republik mit denen Westdeutschlands im Dezember Januar 1954 55 zeigt, daß bei uns dank der straffen Planung des Elektroenergieverbrauchs der Industrie eine viel gleichmäßigere Belastung und damit bessere Ausnutzung der Kapazitäten erreicht wird. Während bei uns nachts die Belastung bei einer um 9% höheren Erzeugung je Kopf der Bevölkerung nur auf 68% der Spitze zurückging, zeigt die westdeutsche Kurve einen Rückgang auf 47%. Auf die Kontingentierung des Stromverbrauchs der Industrie wird unsere Planwirtschaft auch weiterhin nicht verzichten. Durch Stromverbrauchsnormen für stromintensive Produkte wird sie sich dafür die exakten Planungsunterlagen schaffen. Die steigenden Bedürfnisse der Bevölkerung (die Produktion von Elektrohaushaltgeräten steigt in diesem Jahre auf 143% gegenüber 1954) bedingen einen erhöhten Spitzenbedarf. Die Elektrifizierung der Landwirtschaft ist Schwerpunktaufgabe als Voraussetzung für den sozialen Fortschritt auf dem Lande. Wachsende kulturelle Bedürfnisse (dazu gehört u. a. auch die Entwicklung der öffentlichen Beleuchtung) erhöhen die Spitzenlast. Sie wird gedeckt durch Dampf- oder Wasserspitzenkraftwerke, Pumpspeicherwerke und durch Absenken der Grundlast durch Verlagerung der Produktion von industriellen Großverbrauchern in lastschwache Zeiten.

4.1 Spitzenwerke

Mit Inbetriebnahme der neuen Anlagen werden die meist fremdbekohlten älteren Werke in den Städten zu Spitzenwerken, die nur noch einen Teil des Jahres in Betrieb sind. In gewissem Umfang decken die öffentlichen Heizkraftwerke (auch einige alte städtische Kraftwerke werden zu solchen rekonstruiert) Spitzenlast. Das erfordert allerdings entsprechende Fahrweise und Auslegung, z. B. den Einsatz von Entnahme-Kondensations-Warmwassermaschinen, so daß als Wärmeträger im Heiznetz das im Kondensator erwärmte Kühlwasser dient. Der Kapazitätszuwachs durch Wasserkraft-Spitzenwerke ist unbedeutend.

4.2 Pumpspeicherwerke

Die Leistung der Pumpspeicherwerke wird auch bei Vollausbau, obwohl in der Deutschen Demokratischen Republik die größte Anlage Deutschlands geplant ist, nur einige wenige Prozent der installierten Leistung betragen. Trotzdem besitzen sie im Verbundbetrieb eine besondere Bedeutung, die auch durch den relativ geringen Wirkungsgrad der Speicherung von rd. 60% nicht geschmälert werden kann. Als Sofortreserve des Lastverteilers können sie ferngesteuert in kürzester Zeit sowohl zur Lieferung als auch zur Belastung herangezogen werden. Ihr Einsatz trägt wesentlich zur kontinuierlichen Belastung der Primärkraftwerke im Bestpunkt bei. Der Transport der Energie in Schwachlastzeiten zum Pumpspeicherwerk, das in oder am Verbraucherschwerpunkt liegt, erspart Mittel zum Ausbau der Übertragungsnetze entsprechend den ausgepufferten Spitzen.

4.3 Absenken der Grundlast

Die Gegenüberstellung der Kosten ergibt, daß es auch bei der weiteren Entwicklung der Stromerzeugungsbasis volkswirtschaftlich zweckmäßiger ist, einen Teil der stromintensiven Verbraucher der Schwerchemie und Metallurgie in den relativ kurzen Spitzenzeiten herauszunehmen und durch Vergrößerung der Produktionskapazitäten die Erfüllung des Produktionsplans durch Mehrproduktion in Schwachlastzeiten zu sichern. Der Investitionsbedarf für Kapazitäten an Karbid- und Elektroöfen ist niedriger als für Spitzenwerke. Diese Grundlastabsenkung und Verlagerung der Abnahme bietet wie der Einsatz der Pumpspeicherwerke darüber hinaus vor allem den entscheidenden Vorteil einer kontinuierlichen Auslastung der Grundlastwerke, die bei Höchstdruckanlagen Voraussetzung für lange Lebensdauer der Kessel usw. ist.

4.4 *Blindleistungshaushalt*

Die Entwicklung der letzten Jahre hat gezeigt, daß es nicht genügt, den Wirkleistungshaushalt zu bilanzieren, sondern daß parallel dazu Maßnahmen notwendig sind, die eine wirtschaftliche Deckung des Blindleistungsbedarfs sichern.

Zur Zeit wird der Blindstrom überwiegend aus den Kraftwerken über lange Leitungen zum Verbraucher geführt. Schlechte Spannungsverhältnisse und geringe Stabilität des Verbundsystems sind damit unvermeidlich. Es muß unbedingt erreicht werden, daß das Netz von dem mit enormen Netzverlusten verknüpften Blindleistungstransport entlastet und der Blindstrom bereits beim Verbraucher weitgehend kompensiert wird. Die Generatoren der Verbundnetzkraftwerke sollen in Zukunft mit dem aus Stabilitätsgründen günstigsten Leistungsfaktor gefahren werden. Zentralkompensationsanlagen (wasserstoffgekühlte rotierende Phasenschieber in Freiluftausführung) garantieren diesen Betrieb unabhängig vom jeweiligen Blindleistungsbedarf und übernehmen die Spannungshaltung an den Einsatzpunkten im Verbundnetz. Schließlich können wichtige Übertragungsleitungen mit Einsatz der Kompensationsmittel mit natürlicher Leistung betrieben werden.

5. Übertragungsanlagen

Zur Verbindung der bis zu 350 km auseinanderliegenden Erzeuger- und Verbraucherschwerpunkte wird in den nächsten Jahren ein die Deutsche Demokratische Republik überspannendes 220-kV-Netz, das 1960 über 1100 km Trassenlänge er[illegible] reicht haben wird, ausgebaut. Acht neue 220-kV-Umspannwerke sind in Betr[illegible] zu nehmen. Um 2800 MVA steigt die Kapazität der installierten Umspann[illegible] 220 kV Oberspannung an. Die Leitungen werden mit Eisengittermasten m[illegible] fundamenten — Abspannmaste mit abgestuften Blockfundamenten — a[illegible] Die Bündelleiter der Systeme aus 2×185er Stalu-Seilen sind horizontal a[illegible] und mit Langstabisolatoren mit Lichtbogenschutzkörben isoliert. [illegible] 24 kg/mm² gespannte Blitzseile sichern gegen direkte Einwirkung atmosp[illegible] Überspannungen. Das 220-kV-Netz wird starr bzw. teilstarr geerdet betri[illegible] der Erdschlußreststrom bei der geplanten Leitungslänge zu groß wird. D[illegible] widerstandslos geerdeten freien Umspannernullpunkte werden durch [illegible] ableiter geschützt. Der Übergang zu starrer Erdung erfordert sorgfältig be[illegible] Erdungsanlagen, um Beeinflussung z. B. der Fernmeldeeinrichtungen und [illegible]

dung durch unzulässige Schrittspannungen im Kurzschlußfall zu vermeiden. Diese Gefahren sind aber durchaus mit wirtschaftlichem Aufwand zu beherrschen, ohne daß technisch nicht begründeten Forderungen, wie z. B. nach Schutznetzen an Kreuzungen, stattgegeben zu werden braucht.

Die 220-kV-Schaltgeräte werden an den Schwerpunkten für 4000 MVA Abschaltleistung ausgelegt und arbeiten mit einpoliger Kurzschlußfortschalteinrichtung. Als Voraussetzung für die richtige Bemessung werden die Methoden und Geräte zur Messung der Frequenz der wiederkehrenden Spannung und Kurzschlußbeanspruchung am Einbauort entwickelt. Die Übernahme der über 25jährigen Erfahrungen der ČSR mit starr geerdeten Netzen und die zur Verfügung gestellten Konstruktionsunterlagen für entsprechende Schutzeinrichtungen sind für uns eine große Hilfe bei der Einführung der Schnellwiedereinschaltung. Sämtliche Umspannwerke werden einheitlich als Freiluftanlagen gebaut. Dabei wird bei großen Anlagen die Reihen-Längsbauweise wegen der Materialeinsparung gegenüber anderen Bauformen bevorzugt. Beim Bau der Schaltwarten sind folgende Grundsätze zu beachten:

Übersichtlichkeit, bequemes, blendungsfreies Ablesen der Instrumente, gute akustische Verhältnisse, geringster Platzbedarf und Verwendung genormter Bausteine. Von den bisher in der Deutschen Demokratischen Republik neu gebauten Warten erfüllt kaum eine diese Bedingungen. Beim Ausbau des 220-kV-Netzes werden die Gesichtspunkte berücksichtigt, die Voraussetzung für einen gesamtdeutschen Verbundbetrieb und den Verbundbetrieb mit den Nachbarstaten sind. Die Notwendigkeit einer 400-kV-Übertragung ist für uns bis 1960 nicht gegeben, wohl aber für die weitere Entwicklung im dritten Fünfjahrplan zu untersuchen. Auch der eventuelle Anschluß an eine europäische 400-kV-Schiene ist beim Ausbau des Verbundnetzes der Deutschen Demokratischen Republik berücksichtigt.

Die bisherigen 110-kV-Verbundnetze übernehmen mit Ausbau des überlagerten 220-kV-Netzes weitgehend den Charakter bezirklicher Verteilungsnetze. Die damit gleichlaufende Entlastung vom überbezirklichen Stromaustausch hat zur Folge, daß nur ein relativ geringer Bau neuer 110-kV-Leitungen, im wesentlichen Zubringerleitungen, nötig wird. Hinzu kommt, daß die Übertragungsfähigkeit mit Entlastung vom Blindstromtransport und Umstellung auf die Normspannung 110 kV (die meisten alten Anlagen besitzen Umspanner mit 100 kV als Grundoberspannung) durch Austausch von Umspannern und Zusatzumspannern ohne wesentliche Kosten um 10 bis 20% steigt. Die 110-kV-Umspannwerke dagegen müssen durch Aufstellen von allein 60 Großumspannern mit 110 kV Oberspannung (eingesetzt werden bevorzugt Aluminium-Transformatoren) beträchtlich erweitert werden.

Im 110-kV-Netz wird die induktive Erdung, die sich bei richtiger Einstellung des kompensierenden Spulenstroms gut bewährt hat, beibehalten. Das bedingt jedoch, daß rd. 700 A zusätzlich, entsprechend dem Ausbau bis 1960, kompensiert werden müssen und der Anstieg des Erdschlußreststroms eine Aufteilung in 110-kV-Teilnetze, die über 220-kV- oder Isolierumspanner mit Längs- und Querregelung gekuppelt sind, nötig macht. Im 110-kV-Netz wird selbstverständlich, wie auch in den Mittelspannungsnetzen, generell zur hier allerdings dreipoligen Schnellwiedereinschaltung übergegangen.

6. Verteilungsanlagen

Die spezifischen Flächenbelastungen steigen in den nördlichen Bezirken der Deutschen Demokratischen Republik auf etwa das Doppelte an. Die Elektrifizierung als ein wesentlicher Teil der Mechanisierung der Landwirtschaft, das Entstehen neuer Stadtzentren, der steigende Bedarf der Bevölkerung stellen Aufgaben, die gegenüber denen auf dem Sektor der Kraftwerke und des Hochvoltnetzes nur zu leicht unterschätzt werden. Zur Charakterisierung der Verhältnisse sei hier nur erwähnt, daß für die Rekonstruktion der Mittelspannungs- und Ortsnetze einschließlich der Mittelspannungs-Schaltfelder in 110-kV-Werken in den nächsten fünf Jahren Mittel in dreifacher Höhe, wie für das 220-kV-Netz benötigt, vorgesehen sind. Dabei sind die Ersparnisse bereits berücksichtigt, die sich ergeben, wenn in Zukunft alle Netze koordiniert werden und der getrennte Ausbau für den Bergbau, die chemische Industrie und die Reichsbahn entfällt. Die Speisung der elektrischen Bahnanlagen wird bei der weiteren Entwicklung über die jetzige $16^2/_3$-Hz-Versorgung hinaus aus dem öffentlichen Netz erfolgen, unabhängig davon, ob am Fahrdraht $16^2/_3$ Hz oder 50 Hz benötigt werden.

Die bestehenden Mittelspannungsnetze sind bis zu 40 Jahre alt, die Ortsnetze mit ihren Stationen im wesentlichen in den Jahren 1910 bis 1928 entstanden. Zahlreiche kleine und mittlere Städte und Stadtviertel von Großstädten mit [illegible] der Gesamtabnehmerzahl der Deutschen Demokratischen Republik werden mit Gleichstrom von 110 und 220 V versorgt. Der augenblickliche Zustand der Netze bringt hohe Umform-, Umspann- und Transportverluste mit sich, erschwert die Betriebsführung und vermindert die Rentabilität der Betriebe. In Verteilungsnetzen sind umfassende Rekonstruktionsmaßnahmen nötig, die [illegible] zu planen sind, um im Hinblick auf die begrenzt zur Verfügung stehenden Materialien und vor allem Arbeitskräfte einen auf Schwerpunkte orientierten Ausbau nach weit vorausschauenden Gesichtspunkten zu sichern. Der bisher [illegible] schrittene Weg weiterer Vermaschung kann nicht mehr zum Ziel führen, da ein Stadium erreicht ist, bei dem die erhöhte Kurzschlußbeanspruchung und verminderte Selektivität bei Einfügen einer weiteren Speiche in das Netzgebiet eine Kettenreaktion eine Serie von Folgeinvestitionen auslöst. Im wesentlichen kommt es darauf an, den bestehenden Netzen ein übergeordnetes Netz so überlagern und die Speisepunkte so einzufügen, daß in ländlichen Gebieten mit Strahlennetzen, in Städten mit einfachen selektiven Maschennetzen, bei Verwendung von Umschaltautomatiken auf benachbarte Speisepunkte in Störungsfällen, eine unterbrechungslose Stromversorgung der Abnehmer erreicht wird.

Die Vielzahl der neu zu errichtenden Mittelspannungs- und Ortsnetzanlagen erfordert Standardbauweisen und eine Bereinigung vorhandener, teilweise nicht mehr genormter Betriebsspannungen. Die Umstellung wird allmählich so vor sich gehen, daß Neuanlagen nur noch für wenige Standardspannungen gebaut und im Übergang oft noch mit der aussterbenden Spannung betrieben werden. Die bei Bereinigung von Teilnetzen frei gesetzten Geräte dienen als Ersatz bei Ausfällen im noch nicht umgestellten Teil bzw. für dort unbedingt zu errichtende Erweiterungen für Abnehmeranschlüsse usw. Neue Schalter und Umspanner werden nur noch für die Standardspannungen beschafft. Letztere müssen gegebenenfalls mit umschaltbarer Wicklung aus mehreren Zweigen bestellt werden. Die Netze mit nicht standardisierten Spannungen werden so allmählich in dem Maße eingeengt bzw. ein-

gehen, wie sich die Geräte verbrauchen und Neuinvestitionen nötig sind. Das ist selbstverständlich ein über Jahrzehnte gehender Prozeß.

Die Entwicklung der Spannbetonmaste ist so weit abgeschlossen, daß bei Aufnahme der Produktion ein generelle Einsatz in Ortsnetzen möglich ist. Maste für Leitungen höherer Spannung sind schnellstens zu entwickeln, ebenso Bauformen für Einsatz in den Freiluftschaltanlagen. Holzmaste, die ihre Standsicherheit verloren haben, erhalten Betonmastfüße. In verstärktem Maße gilt es, die störanfälligen Eisenleitungen, die während des Krieges im Zuge der „Kupferaktionen" eingebaut wurden, auszuwechseln. Für lange Strecken ist die Übertragungsfähigkeit durch Reihenkondensatorenanlagen zu erhöhen, um auch den letzten Abnehmer am Leitungsende mit tragbarer Spannung zu versorgen. Ortsnetze werden in Zukunft nur noch als Vierleiter-Drehstromnetze 220/380 V gebaut. Die noch vorhandenen Einphasenwechselstrom-, Zweiphasenwechselstrom- und Drehstromnetze 127/220 V sind ebenso wie die Gleichstromnetze umzustellen. Die Umstellung bedingt gleichzeitig den Austausch der nur für die spezielle Stromart oder Spannung ausgelegten Motoren und sonstigen Geräte als Folgeinvestitionen.

Die durchgeführten Neuanschlüsse unterstreichen, welche Bedeutung dem Programm zur Verbesserung der Verhältnisse auf dem Lande und dem Wohnungsbauprogramm beigemessen wird. 19000 Neuanschlüsse wurden im vergangenen Jahr gebaut. Zur Zeit liegen noch Anschlußforderungen in Höhe von 1,08% der Gesamtabnehmerzahl der Deutschen Demokratischen Republik vor, wovon rd. 50% im Rahmen des Investitionsplans 1955 ausgeführt werden. Uns bekannte westdeutsche statistische Angaben zeigen, daß erst 87 bis 95% der Anschlüsse, speziell bei der Landwirtschaft, ausgeführt sind. Das beweist, welchen Vorsprung wir in der Deutschen Demokratischen Republik auf diesem Gebiet erreicht haben. Dabei entstanden bei uns im Zuge der Bodenreform Tausende von Neubauerngehöften.

7. Standardisierung

Festlegen von verbindlichen Standardbauweisen ist die entscheidende Voraussetzung für Beschleunigung und Verbilligung der Projektierung und des Baues neuer Anlagen. Dabei sind die am häufigsten vorkommenden Anlagen bzw. Anlagenteile zuerst zu vereinheitlichen, das sind in unserem Fall Ortsnetz- und Mittelspannungsanlagen, Masten, Schaltfelder, Zellen, Wartenbausteine usw. Eine schwerwiegende Entscheidung ist im Rahmen dieses Programms bezüglich der zukünftigen Standardspannungen zu fällen.

Tafel 1 zeigt neben der prozentualen Verteilung der Betriebsspannungen für 1 bis 110 kV — es werden 19 verschiedene Spannungen ausgewiesen — dieselbe Aufteilung für drei Bezirke mit verschiedenem wirtschaftlichem Charakter. Das hier zutage tretende Durcheinander ist ein Ausdruck für die Zersplitterung der Elektroenergiewirtschaft in der hinter uns liegenden kapitalistischen Epoche. Bestanden doch 1945 rd. 2000 verschiedene EVU, die nach ihren besonderen Gesichtspunkten und Interessen ihre Anlagen planten und bauten. Vom Standpunkt des einzelnen EVU aus betrachtet mochte wohl die Wahl einer uns heute unverständlich erscheinenden Betriebsspannung tatsächlich dem seinerzeitigen wirtschaftlichen Optimum entsprochen haben. Jetzt ist es aber notwendig, endgültig mit den aus der unterschiedlichen Entwicklung herrührenden Traditionen zu brechen und die für die Deutsche Demokratische Republik günstigste Lösung unter

Tafel 1. Verteilung der Betriebsspannungen

DDR gesamt Gr. d. Fläche: 107459 km²						Bezirk *A* Gr. d. Fläche: 5943 km² Abn.-Anschl.: 508620 Stück (Industriegebiet)			
Spannung in kV	Freileitung in %	Kabel in %	Umsp.-Leistung in %	Freileitung km	%	Kabel km	%	Umsp.-Leistg. MVA	%
110	8,31	—	35,6	250,00	8,8	—	—	120,00	14,2
80	0,08	—	—	—	—	—	—	—	—
60	0,83	—	2,2	70,00	2,5	—	—	17,00	2,00
50	3,60	0,37	9,9	—	—	—	—	—	—
40	0,84	0,02	2,1	—	—	—	—	—	—
35	0,19	0,00	0,6	—	—	—	—	—	—
30	3,22	3,68	9,2	415,0	14,7	60,0	2,0	259,84	31,0
20	3,22	3,55	3,6	—	—	—	—	—	—
15	55,92	14,25	18,7	812,05	28,7	49,69	1,6	[illegible]	[illegible]
11	1,65	0,00	0,2	—	—	—	—	—	—
10	17,7	39,3	10,0	984,15	35,0	1372,76	45,0	[illegible]	[illegible]
8,66	0,03	4,4	0,2	13,48	0,5	109,78	3,3	[illegible]	[illegible]
7	0,19	0,02	0,02	—	—	—	—	—	—
6	2,54	20,3	3,7	62,64	2,2	998,56	33,0	[illegible]	[illegible]
5	0,72	5,6	1,9	74,73	2,6	130,11	4,3	[illegible]	[illegible]
4	0,21	1,03	0,08	12,68	0,4	56,03	1,8	[illegible]	[illegible]
3	0,50	9,55	1,8	131,15	4,6	259,81	8,5	[illegible]	[illegible]
2	0,04	0,14	0,04	6,1	2,1	8,10	0,3	[illegible]	[illegible]
1	0,18	—	0,00	—	—	—	—	—	—
	100%	100%	100%	*2831,98*		*3044,84*		*843,01*	

Berücksichtigung der Entwicklung in der Sowjetunion und den Volksrepubliken als Grundlage der Standardisierung zu nehmen. Den dabei sich u. U. ergebenden örtlichen Nachteilen stehen u. a. die entscheidenden Vorteile der besseren Ausnutzung der Fertigungskapazitäten, vor allem beim Maschinenbau, Verringerung der Reserve- und Lagerhaltung, der einheitlichen und damit besseren Wartung gegenüber.

In Tafel 1 besitzt der Bezirk *A* mit überwiegend 110/30/10-kV-Verteilung die größte Abnehmerdichte. Industrieschwerpunkte wechseln mit kleineren Gebieten landwirtschaftlichen Charakters ab. Die Anschlußwerte der Industrieabnehmer dürften die Ursache für die Bevorzugung der 30-kV-Spannung gewesen sein. In den Gebieten mit geringerer Abnahmedichte waren 10 kV die wirtschaftlichste Verteilungsspannung. Im Bezirk *B* mit gemischtem industriell-landwirtschaftlichem Charakter genügten 10 kV zur Verteilung der Elektroenergie. Die übergeordnete Spannung von 50 kV vermochte den Transport zu den weiter auseinanderliegenden

in der Deutschen Demokratischen Republik

Bezirk *B* Gr. d. Fläche: 3996 km² Abn.-Anschl.: 117890 Stück (gemischt Industrie und Landwirtschaft)						Bezirk *C* Gr. d. Fläche: 7337 km² Abn.-Anschl.: 61497 Stück (vorwiegend Landwirtschaft)					
Freileitung km	%	Kabel km	%	Umsp.-Leistg. MVA	%	Freileitung km	%	Kabel km	%	Umsp.-Leistg. MVA	%
184,70	7,4	—	—	145,00	36,4	63,1	1,5	—	—	80,00	26,2
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
305,70	12,3	1,76	0,4	112,65	28,0	185,2	4,5	3,1	1,1	54,7	18,0
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,8	2,9
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	11,1	0,3	—	—	1,5	0,5
196,0	7,8	2,0	0,5	8,65	2,2	—	—	—	—	—	—
273,3	11,0	23,04	5,2	13,13	3,3	2967,0	73,0	105,38	38,5	101,84	33,0
—	—	—	—	—	—	809,0	20,0	—	—	14,32	4,7
1243,57	50,0	282,17	63,2	79,13	20,0	—	—	0,15	0,0	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
315,8	12,5	50,1	11,3	27,98	7,0	20,91	0,5	139,84	51,0	22,05	7,3
18,67	0,7	78,09	17,5	12,59	3,1	7,35	0,2	27,60	10,4	21,84	7,1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,73	0,1	7,61	1,7	0,37	0,1	—	—	—	—	0,20	0,0
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2540,58		*444,77*		*399,5*		*4063,9*		*272,98*		*305,26*	

Speisepunkten zu bewältigen. Bezirk *C* ist gekennzeichnet durch ein großes Versorgungsgebiet mit geringer Abnehmerdichte. Bei den langen Strecken hätte eine 10-kV-Verteilung zu große Verluste gebracht; deshalb wurden 15 kV gewählt, wahrscheinlich mit der Absicht einer späteren Umstellung auf 20 kV. Die 50-kV-Leitungen genügen bereits an vielen Stellen nicht mehr den zu übertragenden Leistungen und werden z. T. auf 110 kV umgestellt.

Unter Berücksichtigung der in Bild 5 dargestellten, unter verschiedenen Annahmen auf der Preisbasis von 1944 berechneten Zuordnung der wirtschaftlichsten Übertragungsspitzenleistung zu den Spannungen ergibt die Auswertung des statistischen Materials, daß mit 110 30 20 (15) 10 (6) kV, also sechs gegenüber neunzehn Spannungsreihen, auszukommen ist.

Dabei dürfte für dichter besiedelte Gebiete mit Industrie 110 30 10 kV die beste Lösung geben, während für auch in der Perspektive sich gering entwickelnde ländliche Gebiete 110 20 15 kV Vorteile zu bieten scheint oder ein 110 30-kV-

System mit direkter Abspeisung von 30 auf 0,4 kV. Die Abgrenzung ist schwierig, da die Kosten der notigen 110-kV-Speisepunkte erheblich sind. Die Untersuchung ergibt weiterhin, daß die Umstellung der in den schwächer besiedelten Gebieten der Deutschen Demokratischen Republik vorhandenen 15-kV-Netze auf 20 kV dem zu erwartenden Leistungsanstieg nur eine beschränkte Zeit gerecht wird. Wir müssen auf weite Sicht planen, denn Teillösungen verursachen einen erheblichen Mehraufwand. Aus diesem Grunde kann die in Westdeutschland zu erkennende Tendenz der Umstellung auf 20 kV für uns nur bedingt zutreffen. Ehe eine Festlegung getroffen werden kann, sind noch umfangreiche Erörterungen, vor allem auch mit der gerätefertigenden und Apparate-Industrie, nötig.

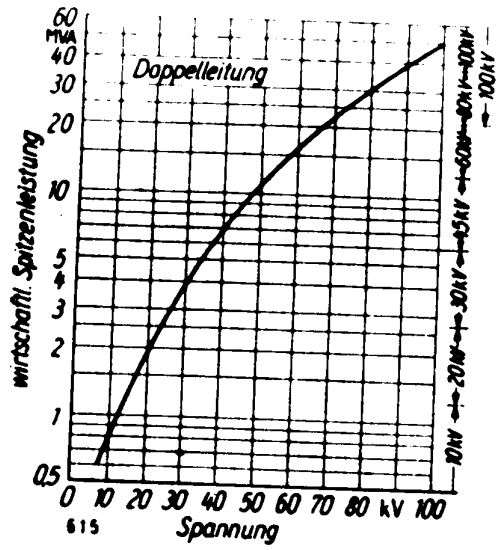


Bild 5. Wirtschaftlichste Übertragungsspannung

Eine bedeutende Standardisierungsaufgabe für die Elektroenergiewirtschaft ist neben der Aufstellung einheitlicher Begriffsbestimmungen die Festlegung von Richtlinien für einheitliche Wartung und Instandhaltung der Anlagen. Von der HV Elektroenergie des Ministeriums für Schwerindustrie wird die Herausgabe der „Regeln der technischen Betriebsführung für Kraftwerke und Netze" vorbereitet, die einmal für jede Anlage das technische Minimum der Ausrüstungen vorschreiben, zum anderen die Aufgaben und die Verantwortung des Bedienungspersonals, der Meister und Ingenieure klar und eindeutig festlegen. Sie werden unter reger Mitarbeit der Spezialisten der Energiebetriebe und der Betriebssektionen der Kammer der Technik, Fachverband Energie, erarbeitet.

Die in diesen Betriebsvorschriften verankerte, vorab seit 1. Januar 1955 für die öffentlichen Energieversorgungsanlagen bereits eingeführte, vom Institut für Energetik entworfene Störungs- und Schadenstatistik wird mit ihrer wissenschaftlichen Auswertung wesentliche Hinweise über die Bewährung der eingesetzten Apparate und Geräte und die Güte der Betriebsführung liefern. Damit sollen vor allem auch den Fertigungsbetrieben Hinweise für Neuentwicklungen und Verbesserungen ihrer Produktion gegeben und somit eine oft noch bestehende Lücke in der Zusammenarbeit geschlossen werden.

8. Zusammenfassung und Schluß

An Hand der Darstellung einiger Schwerpunktaufgaben wurde versucht, die Entwicklungstendenz der Elektroenergiewirtschaft für den Zeitraum des zweiten Fünfjahrplans aufzuzeigen. Die Anwendung der höchstentwickelten Technik und die Beschränkung auf wenige Standardbauweisen wurden als wichtige Faktoren für die wirtschaftliche Lösung der gestellten Aufgaben erkannt. Es erscheint mir aber entscheidend, am Schluß festzustellen, daß die Technik von Menschen, von den Arbeitern, Meistern und Ingenieuren in den Energiebetrieben, in den Werken, die unsere Ausrüstungen bauen, von uns allen gemeistert werden muß. *Stalin* hat einmal ausgeführt: „Eine Technik ohne Menschen, die sie gemeistert haben, ist tot, eine Technik mit Menschen an der Spitze, die die Technik gemeistert haben, kann und muß Wunder vollbringen." Die verstärkte Mechanisierung und Automatisierung unserer Anlagen, der Einsatz immer größerer und komplizierterer Maschinen und Geräte erfordert, daß wir unser fachliches Niveau auf die Höhe der gestellten Aufgaben bringen. Der Arbeit der Kammer der Technik kommt in diesem Rahmen eine besondere Bedeutung zu. Schaffen wir darum bei uns allen die Voraussetzungen, dann wird es dem Industriezweig Elektroenergie bei verstärkter Unterstützung durch die Fachkollegen aus der Sowjetunion und den Volksrepubliken, die uns in ihrer Entwicklung auf vielen Gebieten weit voraus sind, gelingen, die zur weiteren Festigung und Entwicklung unserer Deutschen Demokratischen Republik gestellten Aufgaben zu lösen.

6.2 Leitungs- und Stromkreisbezeichnungen in großen Verbundnetzen

Dr.-Ing. *W. Reißig*, Berlin

1. Einleitung

Zum einwandfreien Betrieb eines Netzes, besonders im Verbundbetrieb mit anderen Netzteilen und mehreren Kraftwerken, ebenso um im Störungsfall sofort richtige operative Schaltmaßnahmen zur Herstellung eines normalen, ungestörten Schaltzustandes durchführen zu können und um Unfälle bei Arbeiten an den Leitungen zu verhindern, ist es unbedingt erforderlich, die Leitungen, die die einzelnen Kraftwerke und Umspannwerke verbinden, in irgendeiner Form gültig und ohne die Möglichkeit einer Verwechslung zu bezeichnen. Die Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die Errichtung von Starkstromanlagen von 1 bis 1000 V und darüber (DIN 57101) verlangen unter § 10, Abs. C, daß in jeder Schaltanlage für die verschiedenen Stromkreise Bezeichnungen anzubringen sind. Das gleiche gilt selbstverständlich auch bei Hochspannungsleitungen für die Maste im Gelände.

Es gibt verschiedene Systeme und Methoden der Bezeichnung der Freileitungs- oder Kabelstrecken bzw. Stromkreise. Alle vorhandenen haben sich seit Jahren, teilweise seit Jahrzehnten, in den Betrieben der Energieversorgung eingebürgert und waren ohne Zweifel richtig und angebracht, als die Energieverteilungs- und -versorgungsnetze noch kleine Ausmaße hatten. Mit der laufenden Vergrößerung der Energieversorgungsnetze und der Zusammenschaltung zu immer größeren Verbundsystemen treten allenthalben Schwierigkeiten auf, da verschiedene Bezeichnungssysteme nebeneinander laufen oder gar Doppelbezeichnungen, z. B. bei der Leitungsnumerierung, möglich sind. Es soll deshalb im folgenden versucht werden, die bisher bestehenden Systeme einer kritischen Betrachtung zu unterziehen und ihre Vorteile und Nachteile herauszustellen. Außerdem wird ein grundsätzlich neues System der Leitungsbezeichnung entwickelt und zur Diskussion gestellt.

2. Grundlegende Begriffe aus der Freileitungsschalttechnik

Es scheint nützlich, vor der Erörterung und Besprechung der vorhandenen Systeme für Leitungsbezeichnungen zunächst einmal die in der Elektroenergieversorgung gebräuchlichen Begriffe für die Schaltungen von Leitungen näher zu erläutern:

2.1 Einfach- und Doppelleitungen

Wenn zwei Stationen, d. h. zwei Umspannwerke, zwei Kraftwerke oder ein Umspannwerk und ein Kraftwerk mit einer Drehstromleitung verbunden sind, die in einem Stromkreis auf einem Mastgestänge ausgeführt ist, so spricht man von einer Einfachleitung. Wird die Verbindung durch einen zweiten Stromkreis erweitert, der auf getrenntem Gestänge — demnach auf anderer Trasse — verläuft, so erhält man eine zweite Einfachleitung. Liegen jedoch beide Stromkreise auf dem gleichen Gestänge, so wird eine Doppelleitung gebildet (Bild 1).

2.2 Einschleifen oder Anstich

Liegt im Zuge einer Doppelleitung zwischen zwei Stationen eine dritte oder wird diese im Zuge des weiteren Ausbaus des gesamten Versorgungssystems notwendig, so kann sie auf verschiedene Weise in das Versorgungsnetz eingeschaltet werden.

2.21 *Einschleifung*

Handelt es sich um eine Station, die sehr wichtig für die Gesamtversorgung ist, und soll über diese Station eine größere Leistung transportiert werden, so werden beide Stromkreise unterbrochen und an die Sammelschiene des neuen Werkes

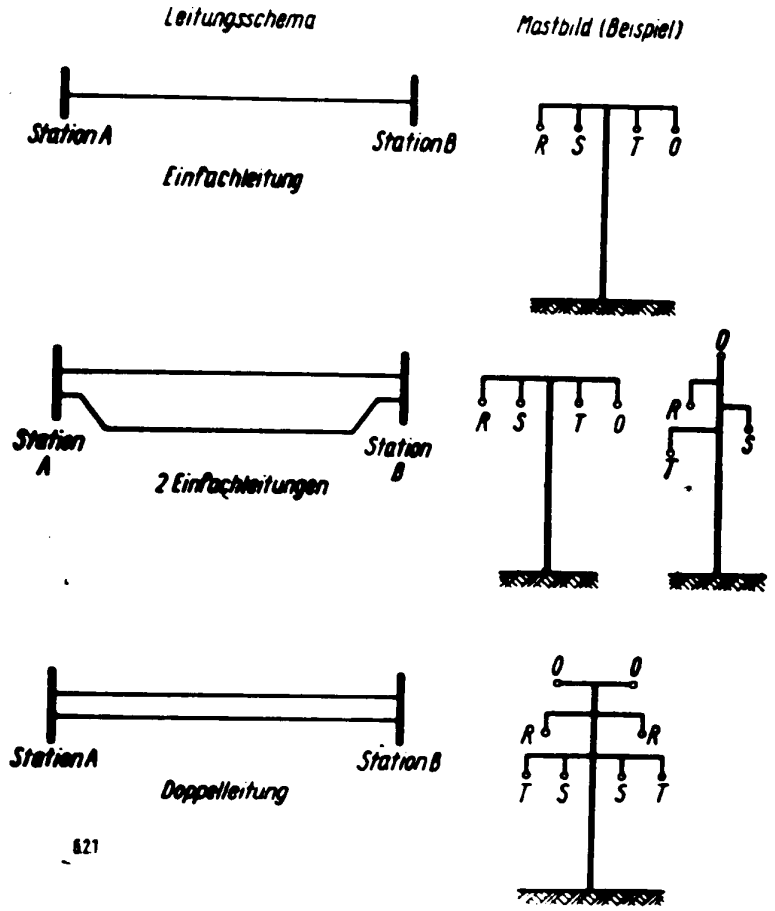


Bild 1

angeschaltet. Aus ursprünglich einer Doppelleitung entstehen zwei vollkommen neue Leitungsabschnitte. Es ist selbstverständlich, daß die Einschleifung durch Trenn- und Leistungsschalter geschehen muß. Wenn die zusätzliche Station nicht leistungsstark ist und auf den höchsten Sicherheitsgrad verzichtet werden kann, so genügt die Einschleifung in einem Stromkreis (Bild 2).

2.22 Stationen, bei denen in erster Linie Abnahme aus dem Verbundnetz erfolgt und die unmittelbar an der vorhandenen Leitungstrasse aufgebaut werden, brauchen nicht unbedingt eingeschleift zu werden. Vielfach werden diese im Stich an ein oder zwei Stromkreise je nach dem verlangten Sicherheitsgrad angeschlossen (Bild 3).

Für den Selektivschutz ist diese Schaltungsart ungünstig, wenn die Strecke von C bis zur Leitung A–B eine größere Länge aufweist. Im Normalfall wird jeweils nur ein Anstich eingeschaltet. Bei dem zweiten bleibt der Schalter offen, so daß man beim Ausbleiben der Spannungen auf dem einen Stromkreis auf den anderen umschalten kann. Dafür existieren automatisch arbeitende Umschaltgeräte.

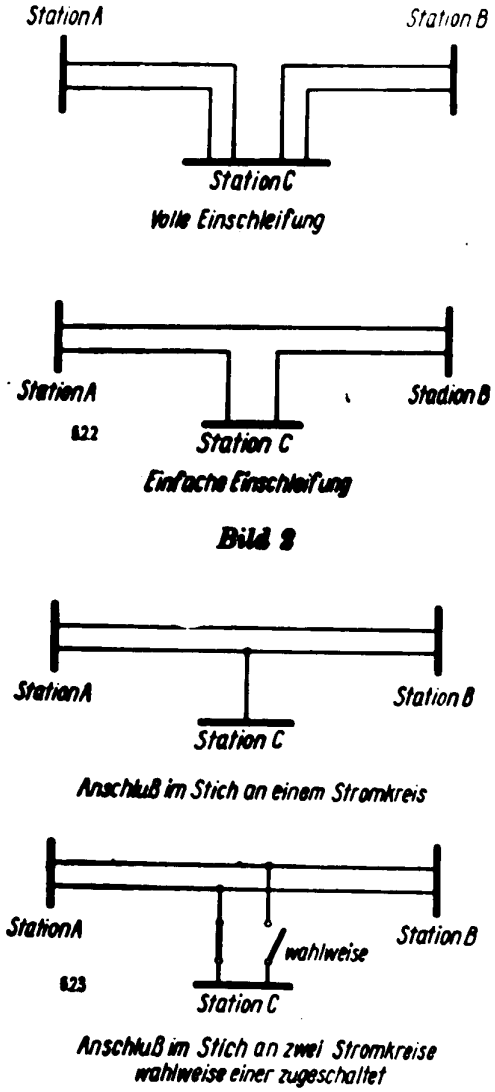
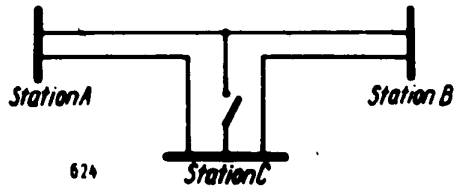


Bild 2

Bild 3

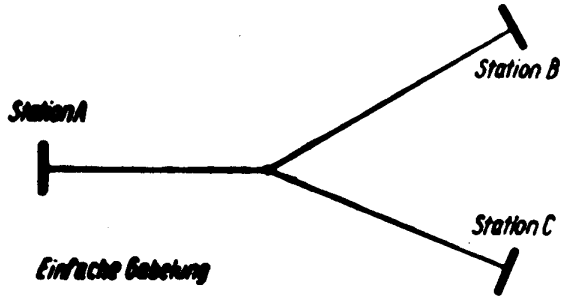
2.3 Eine weitere Möglichkeit des Anschlusses von Stationen im vorhandenen Netzgebilde ist die, daß normal ein Stromkreis eingeschleift ist, der andere im Stich heranführt. Sein Schalter ist offen, und wenn im Störungsfall die eingeschleifte Leitung beiderseits spannungslos wird, wird er geschlossen. Von dieser Möglichkeit des Anschlusses wird auch gern gemäß Bild 4 in Station C Gebrauch gemacht. Wenn es sich um eine Einspeisung über ein Kraftwerk im Mittelspan-

nungsnetz handelt, fließt die Leistung — bedingt durch die Belastungsverhältnisse im Netz — von Station *C* direkt nach Station *B*, teilweise aber auch von Station *C* über Station *A* nach *B*. Wird die Station *C* im Stich über Leistungsschalter an die Station *A—B* gelegt und der Schalter mit einem Schutz ausgerüstet, der im Störungsfall im Netz unverzüglich auslöst, so besteht eine normale Einschleifung mit für die Arbeit des Schutzes einwandfreien Verhältnissen (Bild 4).

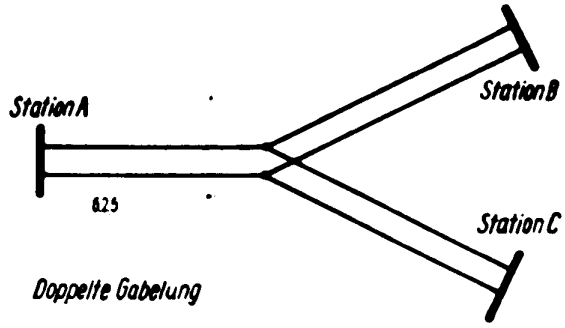


Station C eingeschleift, Stich in Reserve, wird geschlossen wenn A-C u B-C gestört, A-B in Ordnung.

Bild 4



Einfache Gabelung



Doppelte Gabelung

Bild 5

2.4 Besonders ungünstige Leitungsgebilde sind die sogenannten Gabeln oder Dreibeine, sowohl bei Einfach- als auch bei Doppelleitungen (Bild 5). Hier treten in verstärktem Maße schutztechnische Schwierigkeiten ähnlich wie bei dem Anschluß durch Stich auf.

Nachdem nunmehr die grundsätzlichen Begriffe der Leitungstechnik geklärt sind, sollen die einzelnen Leitungsbezeichnungssysteme besprochen werden.

3. Bezeichnungssysteme für Hochspannung-Freileitungs- und Kabelverbindungen

Grundsätzlich muß zwischen Leitungs- bzw. Trassen- und Stromkreisbezeichnungen unterschieden werden. Die Betrachtung wird zeigen, daß einige bestehende Bezeichnungssysteme diese Unterschiede verwischen.

3.1 Bezeichnung nach den Ortsnamen der durch die Strecke verbundenen Stationen

Eine verhältnismäßig einfache Methode, durchaus verwendbar in kleineren Netzen und bei Einfachleitungen, ist die der Bezeichnung nach den Ortsnamen der Stationen, die durch die Leitung verbunden werden.

Bei Auslösungen und Schaltungen wird dann wie folgt gemeldet bzw. im Schaltprogramm oder im Betriebstagebuch festgehalten: Im UW Adorf hat 10.30 Uhr die 100-kV-Leitung Beheim ausgelöst. Oder: Die 100-kV-Leitung Adorf-Beheim ist beiderseits mit Leistungsschalter abgeschaltet, die Trennstücke sind gezogen. Die Leitung ist kurz geschlossen und geerdet.

Die Bezeichnung nach Ortsnamen hat den großen Vorteil, daß sich für das Betriebspersonal jeweils konkrete Vorstellungen damit verbinden und schon bei einer evtl. Störungsmeldung ein Überblick über den Umfang der Unterbrechung der Stromlieferung und der damit zusammenhängenden Abhilfemaßnahmen möglich ist.

Liegen Verbindungen mit Doppelleitungen vor, so müssen die Stromkreise noch irgendwie unterschieden werden. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten, die auch alle angewendet werden. Man kann die Stromkreise unterscheiden nach der Himmelsrichtung, z. B. 100-kV-Leitung Adorf-Beheim Stromkreis Nord und Stromkreis Süd. Oder man wählt eine Bezeichnung mit römischen und arabischen Zahlen oder nach großen oder kleinen Buchstaben. Eine Bezeichnung der Stromkreise bei Doppelleitungen, die vom Gesichtspunkt der Unfallverhütung aus sehr große Vorteile bringt, ist die Unterscheidung nach Farben, und zwar werden die Stromkreise mit den Farben weiß, schwarz, rot, blau usw. bezeichnet. Eine Leitung bzw. der Stromkreis einer Leitung wird dann wie folgt benannt: 100-kV-Leitung Adorf-Beheim Stromkreis weiß. Bei Eintragungen in Betriebstagebücher und bei Notizen für die Störungsaufklärung genügt es, daß hinter der Ortsbezeichnung ein Ring angebracht ist, der entweder leer gelassen — Stromkreis weiß — voll ausgemalt — Stromkreis schwarz — und senkrecht schraffiert — Stromkreis rot — wird.

Die Bezeichnung der Abgänge in den Schaltwarten und Schaltanlagen ist ebenfalls verhältnismäßig einfach durch Beschriftung mit dem Namen der Gegenstelle und einem entsprechend angelegten farbigen Kreis möglich. Bei Freileitungen wird an den Masten bzw. an den Traversen ein farbig emailliertes Blech, der sogenannte Spiegel, angebracht. Auf diese Weise ist ein Verwechseln der Stromkreise bei Freileitungsarbeiten erschwert. Die Unfallgefahr bei Arbeiten an einem Stromkreis, sofern der andere unter Spannung steht, kann dadurch erheblich gemindert werden, daß an die Monteure Armbinden in der Farbe ausgegeben werden, die mit der des abgeschalteten und zur Arbeit freigegebenen Stromkreises identisch ist. Das ist sehr wichtig bei Leitungsarbeiten und bei Großstörungen, wenn insbesondere

auf Verdrillung und spezielle Behandlung einzelner Leiter, z. B. wegen der Belegung mit Hochfrequenz, Rücksicht genommen werden muß.

Die bisher beschriebene Bezeichnung der Hochspannungsleitungen hat neben den oben geschilderten Vorteilen auch nicht zu unterschätzende Nachteile. Der größte ist darin zu erblicken, daß die Bezeichnungen etwas lang sind, besonders bei gegabelten Leitungen. Dort würde man beispielsweise eine Leitung wie folgt bezeichnen: 100-kV-Leitung Adorf-Beheim/Seehausen. Schwierigkeiten sind dann besonders bei der Durchgabe von Störungsmeldungen, Schaltanweisungen usw. durch die vergrößerten Schreibarbeiten zu erwarten. Aus diesem Grunde ist vielfach eine einfache Nummernbezeichnung für Leitungen eingeführt worden.

3.2 Bezeichnung nach Nummern

Bei der Nummernbezeichnung ist man früher davon ausgegangen, daß von einem Hauptumspannwerk oder Hauptkraftwerk aus die Freileitungen in der Reihenfolge numeriert wurden, wie sie gebaut bzw. in Betrieb genommen wurden. Ein solches

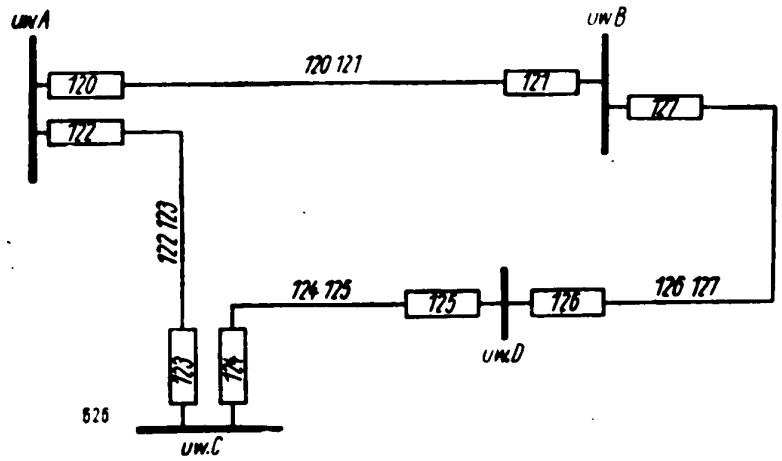


Bild 6

System ist natürlich grundsätzlich abzulehnen. Die einzelnen Stromkreise können bei der Nummernbezeichnung durch gerade und ungerade Zahlen bezeichnet werden, z. B. Bezeichnung einer Doppelleitung von der Station *A* nach der Station *B* als Leitung 5/6 oder durch zusätzliche Bezeichnung mit römischen Zahlen, Buchstaben oder Bezeichnung der Himmelsrichtung. Eingeschleifte Leitungen werden vielfach mit den Buchstaben *a* und *b* bzw. *c*, *d* usw. bezeichnet. Bei der einfachen Nummernbezeichnung ist die oben beschriebene Vermeidung der Unfallgefahr bei der Bezeichnung der Stromkreise nach den Farben durch Ausgabe von farbigen Armbinden an die Monteure ebenfalls nicht ohne weiteres gegeben. An den Traversen der Leitungen werden gestanzte Nummern angebracht, und auch an die Monteure müssen Armbinden mit Nummern ausgegeben werden. Das bedeutet für jede Leitung einen eigenen Satz Armbinden. Außerdem besteht die Gefahr, daß infolge der etwas schwierigen Lagerhaltung die Armbinden überhaupt nicht ausgegeben werden und damit die Unfallgefahr noch erhöht wird.

Für ein modernes Großverbundnetz ist eine Bezeichnung der Leitungen willkürlich nach den Nummern 1 bis unendlich überhaupt nicht mehr diskutabel. Es

wird später gezeigt werden, [illegible] Auswertungen möglich sind, um zu einer betrieblich wertvollen Lösung der Bezeichnungsfragen zu kommen.

Zunächst sei noch auf ein Verfahren der Leitungsbezeichnung hingewiesen, das in Mittelspannungsnetzen vielfach angewendet wird.

3.3 Dieses Verfahren besteht darin, daß alle im Netz eingebauten Schalter numeriert sind, wobei die erste Ziffer den Netzbezirk bzw. die Reihenspannung symbolisieren kann. Die Leitungsnummer setzt sich dann aus den aneinandergesetzten Nummern beider die Leitungsverbindung begrenzenden Schalter zusammen (Bild 6). Der Nachteil eines solchen Beziehungssystems liegt klar auf der Hand. Durch die große Stellenzahl ist die Gefahr des Verschreibens bei schriftlichen Meldungen (auch beim Fernschreiber) und die Gefahr des Verhörens bei telefonischer Durchsage und mündlichen Anweisungen zu groß. Für die Leitungsbezeichnung in einem Großverbundnetz ist demnach auch dieses System grundsätzlich abzulehnen.

3.4 Schließlich sei der Vollständigkeit halber noch eine Methode erwähnt, nach der Leitungen bzw. deren Stromkreis bezeichnet werden. Neben der Leitungsnummer erhält bei Doppelleitungen jeder Stromkreis ein Symbol, z. B. ein auf der Spitze stehendes Quadrat, einen Stern oder einen Kreis und anderes mehr. Auch diese Methode ist für die Leitungs- und Stromkreisbezeichnung in Großverbundnetzen ungeeignet. Deshalb muß ein grundsätzlich neuer Weg begangen werden.

4. Grundsätze für ein einheitliches System der Leitungsbezeichnung

Bei der Entwicklung eines grundsätzlich neuen Systems der Leitungsbezeichnung muß man zunächst davon ausgehen, daß die bei den bestehenden Systemen vorhandenen Mängel nicht übernommen werden dürfen. Es muß fernerhin gewährleistet sein, daß das neue System ausbaufähig ist und das Wachstum des Netzes berücksichtigt. Man darf auch nicht außer acht lassen, daß die Umstellung, abgesehen von den Kosten der Umänderung der Bezeichnung an den Anlageteilen sowohl im Umspannwerk als auch an den Masten, erhebliche Schwierigkeiten und Unfallgefahren mit sich bringt. Jede Änderung eines bestehenden Systems bedingt beim Betriebspersonal eine nicht unbeträchtliche gedankliche Umstellung und Neugewöhnung.

Es seien deshalb eingangs nochmals alle Forderungen zusammengefaßt, die man an ein universelles System der Leitungsbezeichnung stellen muß:

4.1 Die Leitungsbezeichnung muß die Stromkreisbezeichnung mit enthalten.

4.2 Wie schon oben erwähnt, muß sie ausbau- bzw. wachstumsfähig analog mit dem Ausbau des Netzes bzw. einer evtl. Ausweitung des Wirtschaftsgebiets sein. Die derzeitige Lage Deutschlands erfordert, daß nur ein Leitungsbezeichnungssystem geschaffen werden darf, das nach Wiederherstellung der Einheit Deutschlands das gesamte deutsche Wirtschaftsgebiet umfassen kann.

4.3 Eine einfache und unverwechselbare Stromkreisbezeichnung an den Masten muß gewährleistet sein.

4.4 Aus der Art der Bezeichnung soll die Spannung und die Lage im Netz erkenntlich sein.

4.5 Die Bezeichnungen müssen so gewählt werden, daß die Besonderheiten des Dienstablaufs im Verbundbetrieb (Durchsagen von Anweisungen und Meldungen

über den Fernsprecher) gewahrt und berücksichtigt werden. Es müssen also kurze, klare Bezeichnungen gewählt werden, bei denen Verwechslungen durch Hörfehler weitgehend ausgeschlossen sind und ohne Zeitaufwand Notizen gemacht werden können (z. B. dreistellige Nummernbezeichnungen statt Bezeichnung nach Ortsnamen).

5. Leitungsbezeichnung nach dem Dezimalsystem

Bei der Berücksichtigung obiger Punkte kommt für die Leitungs- und Stromkreisbezeichnung in einem Großverbundnetz nur ein der Dezimalklassifikation ähnliches System in Frage. Dabei ist zunächst grundsätzlich folgendes zu beachten: Numeriert werden soll die Trasse. Für die Stromkreise sind Farben-

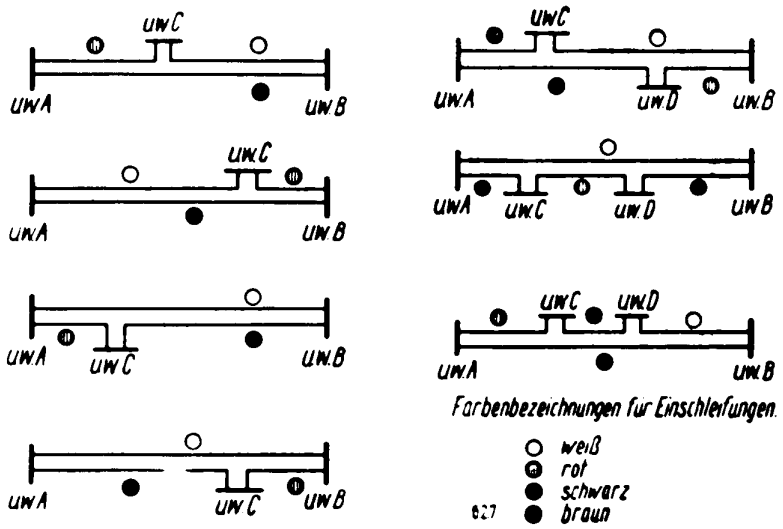


Bild 7

bezeichnungen zu wählen, z. B. weiß, rot, schwarz, braun, d. h. Farben, die in der genormten Phasenbezeichnung für Drehstrom nicht enthalten sind. Grundsätzlich wird wie folgt verfahren:

5.1 Die Farben für die eingeschleiften Leitungsabschnitte werden nach einer feststehenden Reihenfolge verteilt. Diese sei z. B. rot ◐, braun ◔ und blau ●. Bei einer Einschleifung bekommt der längste Abschnitt der eingeschleiften Stromkreise die Farbe, die ihm gemäß der geographischen Lage zusteht, nämlich schwarz ● oder weiß ○ (s. 5.2), der andere unabhängig von der geographischen Lage die Einschleiffarbe rot ◐. Bei mehreren Einschleifungen wird analog vorgegangen. Der längste Abschnitt bekommt die Grundfarbe weiß oder schwarz, der zweitlängste rot, der drittlängste braun, der nächste blau usw. (Bild 7).

5.2 Bei Trassen, die im wesentlichen in ostwestlicher Richtung verlaufen, wird grundsätzlich der nördliche Stromkreis mit „weiß", der südliche mit „schwarz" bezeichnet.

Bei Trassen mit der Hauptrichtung Nord-Süd wird der westliche Stromkreis mit „schwarz", der östliche mit „weiß" bezeichnet. Für Trassen mit gemischten Himmelsrichtungen muß selbstverständlich eine Hauptrichtung festgelegt werden (Bild 8).

Um die gute Orientierung, besonders bei Nebel, schlechter Sicht, eintöniger Landschaft (Wald) oder bei Massierung von Leitungen in der Nähe von Großkraftwerken hinsichtlich der Stromkreise zu erhalten, empfiehlt es sich, die Numerierung der Maste in das System der Stromkreisbezeichnungen mit einzubauen. Das ist bei den oben geschilderten erschwerten Sichtverhältnissen oder Unterscheidungsbedingungen dann wertvoll, wenn aus bestimmten Gründen die Leitungsnummern und Stromkreisfarbenbezeichnungen an den Traversen der Maste nicht zu erkennen sind. Wenn dann z. B. eindeutig festliegt, daß in Blickrichtung mit der steigenden Mastzahl der rechte Stromkreis die Bezeichnung schwarz hat, dann ist schon wieder eine Unfallmöglichkeit ausgeschaltet.

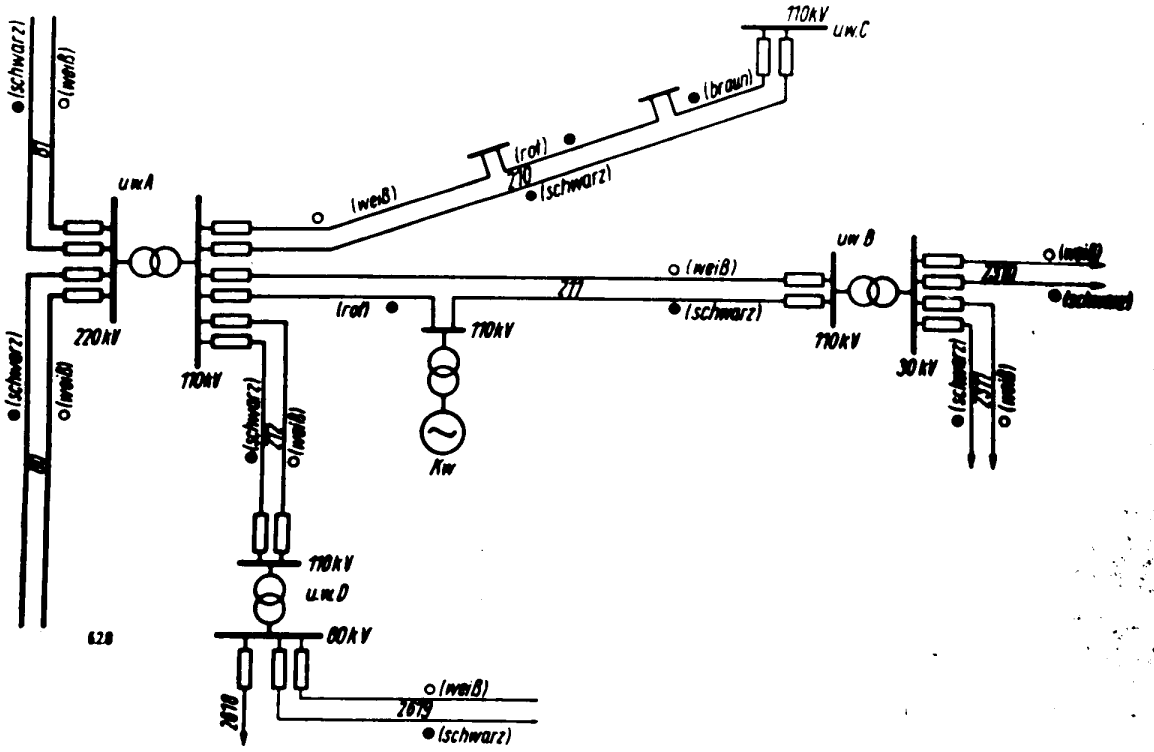


Bild 8

5.3 Betrachten wir nunmehr die Systematik, nach der die Leitungs- bzw. Trassennummern aufgebaut sind.

Im Gegensatz zu der bisher teilweise gebräuchlichen Form, daß mit steigender Nennspannung auch die Nummer steigt, soll von folgenden Gedanken ausgegangen werden: Mit der Höhe der Nennspannung der Übertragungs- und Verbundleitungen fällt die Anzahl der Leitungsverbindungen sehr stark.

Dieses Verhältnis wird sich auch in Zukunft nicht sehr ändern. Es ist also richtig, wenn man den Leitungen der höchsten Nennspannung die niedrigsten Nummern, d. h. einstellige Zahlen, gibt. Damit ist die Grundlage einer auf dem Dezimalsystem aufgebauten Leitungsbezeichnung gegeben (s. Tafel 1).

Tafel 1

Schema der Leitungs- und Trassenbezeichnung nach dem dekadischen System

Spannungen	Leitungs-nummern bzw. Trassen-nummern	Bedeutung der 1. Ziffer	Bedeutung der 2. Ziffer	Zur Verfügung stehende Nr.
400 kV	1—9	entfällt	entfällt	9
200 kV	10—99	Netzbezirk oder Rechtsträger	entfällt	90
100 kV	100—999	Zugehörigkeit zu einer best. Netzmasche, Netzbezirk oder Rechtsträger	entfällt	900
Erste Mittel-spannung	1000—9999	Zugehörigkeit zur über-geordneten 100-kV-Netzmasche, Netz-bezirk od. Rechtsträger	Kennzeich-nung der Reihen-spannung	9000

Beispiele

Ltg. 80 = 220-kV-Leitung im Netzbezirk 8
Ltg. 250 = 110-kV-Leitung im Netzbezirk (Netzmasche) 2
Ltg. 2388 = 30-kV-Leitung, nachgeordnet dem 110-kV-Netzbezirk 2

Grundsatz ist, daß aus der Stellenzahl die Nennspannung der Leitung zu ersehen ist. Bei den 220-kV-, 110-kV- und den ersten Mittelspannungsleitungen kann die erste Ziffer die Zugehörigkeit zu einem Betreuungsbezirk oder einer übergeordneten Netzmasche darstellen. Für die 110-kV-Leitungen stehen 900 dreistellige Nummern zur Verfügung. Dreistellige Zahlen sind jedoch im Betrieb durchaus noch vertretbar. Für die erste Mittelspannung kann für den innerbetrieblichen Dienstverkehr die erste Ziffer, die die übergeordnete Netzmasche bezeichnet, wegfallen, so daß im Dienstverkehr innerhalb einer Netzmasche für die erste Mittelspannung auch nur dreistellige Nummern in Frage kommen. Das ist jedoch nur zulässig, wenn eine Verwechselung mit 110-kV-Leitungen völlig ausgeschlossen ist. Das beschriebene Leitungsbezeichnungssystem ist mit dem Wachstum der Netze ausbaufähig. Mit weiterer Verdichtung der Anlagen und Erhöhung der Übertragungsspannungen wird die Anzahl der 400-kV- und 220-kV-Leitungen steigen. Damit wird dann die 110-kV-Spannung mehr und mehr zur Verteilungsspannung. Dann steht nichts entgegen, das ganze System durch Hinzufügung einer weiteren Dezimale auf allen Ebenen zu erweitern.

6. Zusammenfassung

Die verschiedensten Schaltmöglichkeiten von Übertragungs- und Verbundleitungen, die bisher in unseren Netzen üblich und möglich sind, werden beschrieben, ebenso die bisher angewandten Systeme der Bezeichnung von Trassen und Stromkreisen. Es wird festgestellt, daß bisher alle diese Bezeichnungssysteme einem modernen Großverbundbetrieb nicht genügen können. Es wird ein neues,

auf einer der Dezimalklassifikation ähnlichen Grundlage beruhendes Bezeichnungssystem erläutert und vorgeschlagen. Es ist selbstverständlich, daß dieser erste Vorstoß gegen – man kann wohl sagen Jahrzehnte – angstliche gehütete Betriebsmonopole der einzelnen Hochstspannungsnetze nicht im ersten Anlauf bei allen 100 %ige Anerkennung finden kann. Es ist jedoch wünschenswert, daß der Vorschlag in allen Fachkreisen diskutiert wird. Es ist insbesondere wünschenswert, diese Diskussion auf gesamtdeutscher Ebene zu führen, und nicht zuletzt wäre es zu begrüßen, wenn die Energiefachleute unserer Nachbarländer, insbesondere der Sowjetunion und der Länder der Volksdemokratie, ihre Erfahrungen und Meinungen mitteilen würden.

6.3 Über Gesichtspunkte, die bei der Inbetriebsetzung von Turbogeneratoren zu berücksichtigen sind

Obering. *U. Conrad*, Dresden

Nachdem jetzt in der Deutschen Demokratischen Republik in größerem Umfang Turbogeneratoren gebaut und in Betrieb genommen werden, dürfte es für den Fachmann von Interesse sein, einmal im Zusammenhang alle die wesentlichen praktischen Gesichtspunkte zu erörtern, die bei der ordnungsgemäßen Inbetriebsetzung dieser Maschinen zu berücksichtigen sind.

Die folgenden Ausführungen gelten in erster Linie für die Inbetriebsetzung neuer Generatoren. Für gebrauchte Maschinen, die umgesetzt worden sind, und für Generatoren, die nach größeren Instandsetzungsarbeiten wieder in Betrieb genommen werden, sind sie ebenfalls sinngemäß zu beachten.

Für Generatoren mit Wasserstoffkühlung verlaufen die Inbetriebsetzungsarbeiten grundsätzlich in der gleichen Weise wie für luftgekühlte. Es sind lediglich noch zusätzlich die durch dieses Kühlverfahren bedingten besonderen Forderungen zu berücksichtigen, deren Erörterung jedoch im Rahmen dieses Vortrages zuviel Zeit beanspruchen würde.

1. Überprüfung der Schaltanlage

Die Schaltanlage ist nach ihrer endgültigen Fertigstellung in allen Teilen gründlich zu überprüfen, wobei u. a. besonders auf die Einhaltung der Vorschriften für die Errichtung von Starkstromanlagen (VDE 0100 und 0101) zu achten ist. Weiter ist eine Funktionsprüfung der sämtlichen Geräte und Schutzeinrichtungen vorzunehmen.

2. Messung der Isolationswiderstände

Vor der Inbetriebsetzung sind die Isolationswiderstände der Wicklungen des Generators und der Erregermaschine, der sämtlichen zugehörigen Geräte und Verbindungsleitungen und der Nutenthermometer zu messen.

Die Isolationswiderstände der drei Phasen der Ständerwicklung sind bei geöffneter Schaltung und abgetrennten Zuleitungen einzeln gegeneinander und gegen das Eisen zu messen. Als Ausgangswert für die Beurteilung des Trocknungsvorgangs ist außerdem der Isolationswiderstand in der beim Trocknen benutzten Schaltung — nötigenfalls zusammen mit den angeschlossenen Zuleitungen — zu bestimmen.

Der Widerstand der Isolation des erregerseitigen Lagerbocks und der Grundplatte der Erregermaschine sowie der Ölleitungen ist bei ausgebauten oder angehobenem Läufer zu messen, wobei besonders auf die Isolation der Schrauben zu achten ist.

Für die Niederspannungskreise kann ein Isolationsmesser für 500 V Spannung benutzt werden, während für die Ständerwicklung ein zuverlässiger Isolationsmesser für mindestens 1000 V gebraucht wird.

Etwa bei diesen Messungen festgestellte Isolationsfehler, die nicht auf den Einfluß von Feuchtigkeit zurückzuführen sind, müssen vor der Inbetriebsetzung beseitigt werden.

3. Messung der ohmschen Widerstände der Wicklungen

Um zuverlässige Vergleichswerte für die laufende Überwachung und besonders bei etwa im Laufe der Zeit auftretenden Störungen bzw. Wicklungsschäden zu gewinnen, empfiehlt es sich, vor der Inbetriebsetzung die ohmschen Widerstände der sämtlichen Wicklungen der Erregermaschine und des Generators sowie der Nutenthermometer und sonstiger Fernthermometer im kalten Zustand zu messen und mit den Ergebnissen der Prüffeldmessungen zu vergleichen.

Von ganz besonderer Wichtigkeit ist die einwandfreie Messung des kalten Widerstandes der Läuferwicklung und ihrer Temperatur, da diese Meßergebnisse als Ausgangswerte für die Bestimmung der Erwärmung aus der Widerstandszunahme (vgl. 12) dienen. Der Läuferwiderstand wird zweckmäßig aus Spannungs- und Strommessungen mit Präzisionsgeräten bestimmt. Es ist empfehlenswert, die Meßströme in der Größenordnung von 30 bis 50 A (Speisung durch eine Schweißmaschine) zu wählen und die gleichen Meßgeräte für die laufenden Widerstandsmessungen beim Erwärmungsversuch zu verwenden. Bei der Durchführung der Messungen muß man sich beeilen, um eine Erwärmung der Wicklung durch den Meßstrom zu vermeiden.

4. Mechanischer Lauf

Vor dem erstmaligen Anlauf des Maschinensatzes ist der Nebenschlußregler und der Schalter der Entregungseinrichtung auszuschalten und der Sicherheit halber der Nebenschlußkreis der Erregermaschine an einer geeigneten Stelle sichtbar zu unterbrechen. Das gleiche gilt für eine etwa vorhandene Hilfserregermaschine. Der Läuferstromkreis wird durch Abheben der Bürsten eines Schleifrings sichtbar unterbrochen. Die Generatorableitungen sind hinter den Stromwandlern, aber möglichst vor dem Schalter, durch eine für den Nennstrom bemessene Verbindung kurzzuschließen. Wenn der Kurzschluß nicht vor dem Schalter eingelegt werden kann, ist dieser zuverlässig zu blockieren.

Diese Maßnahmen sind erforderlich, damit bei den anschließenden rein mechanischen Versuchen nach Möglichkeit jede Gefahr für das Bedienungspersonal sowie für den Generator und die Erregermaschine ausgeschlossen wird.

Bevor mit den elektrischen Inbetriebsetzungsarbeiten begonnen werden kann, muß der Maschinensatz im unerregten Zustand längere Zeit mechanisch leer gelaufen sein, wobei besonders auf den Ölumlauf, die Lager- bzw. Öltemperaturen und den ruhigen Lauf zu achten ist.

Die Schleifringe des Generators und der Kollektor der Erregermaschine müssen vollkommen rund laufen. Die Bürsten sind sorgfältig einzuschleifen und müssen sich in den Haltern leicht bewegen, dürfen aber nicht klappern. Der Bürstendruck ist für alle Halter gleichmäßig einzustellen.

Der wegen der Beobachtung der Lager und der Überprüfung der Turbine längere Zeit dauernde rein mechanische Leerlauf wird gleichzeitig zur Vortrocknung der Wicklungen ausgenutzt (vgl. 6.1).

5. Inbetriebsetzung der Erregermaschine

Sollte ausnahmsweise die Einstellung der Bürstenbrücke der Erregermaschine nicht gekennzeichnet sein, so ist in der bekannten Weise bei stillstehender Maschine

nach dem Induktionsverfahren bei Fremderregung die neutrale Zone einzustellen und diese Einstellung dauerhaft zu kennzeichnen.

Die Maschine wird zunächst im Leerlauf (Bürsten von einem Generatorschleifring abgenommen) erregt, wobei etwaige Schaltfehler richtigzustellen sind. Im Anschluß hieran wird bei spannungsloser Maschine der Hauptstromkreis durch Auflegen der Schleifringbürsten geschlossen und die Maschine belastet, wobei der Generator im Kurzschluß läuft. Auf den einwandfreien mechanischen und elektrischen Lauf der Kollektorbürsten ist dabei besonders zu achten. Die zuverlässige Beurteilung der Stromwendeverhältnisse ist natürlich erst bei der Belastung des Generators möglich.

Eine etwa vorhandene Hilfserregermaschine ist sinngemäß zu behandeln.

6. Trocknungsvorgang

Das einwandfreie Trocknen der Wicklungen ist von ganz besonderer Bedeutung. Deshalb soll die Durchführung dieser wichtigen Maßnahme etwas ausführlicher behandelt werden.

Zweckmäßig wird, wie das bei Synchronmaschinen allgemein üblich ist, bei kurzgeschlossener Ständerwicklung mit Strombelastung getrocknet. Das hat im Gegensatz zu der Beheizung von außen den großen Vorteil, daß die Wärme in der Wicklung selbst erzeugt wird, die Trocknung also von innen nach außen erfolgt, und daß außerdem der Trocknungsvorgang durch die Lüftung wirksam unterstützt wird. Im einzelnen ist dabei zu beachten:

6.1 Ständerwicklung

Die Ständerwicklung wird, wie bereits unter 4. erwähnt wurde, kurzgeschlossen.

Zweckmäßig wird zunächst nur mit Luft getrocknet. Zu diesem Zweck wird der Generator ungefähr 10 bis 15 h lang im stromlosen Zustand mit der Nenndrehzahl betrieben, wobei der Kühlwasserzufluß des Ringlaufkühlers zu schließen ist. Die umgewälzte Kühlluft erwärmt sich dabei durch Reibung erheblich. Dadurch werden nach mehrstündiger Betriebszeit die sämtlichen Maschinenteile gleichmäßig durchwärmt und die Wicklungen zunächst äußerlich getrocknet. Dieses Verfahren ist allerdings nur anwendbar, wenn dabei die Temperatur des Abdampfstutzens der Turbine in den zulässigen Grenzen bleibt.

Generatoren mit Frischluftkühlung können in der gleichen Weise vorgetrocknet werden, indem man die Frisch- und Abluftöffnungen behelfsmäßig abdeckt.

Im unmittelbaren Anschluß hieran wird die Wicklung im Kurzschluß mit Strombelastung getrocknet. Bei kleinen und mittleren Generatoren (bis zu einer Leistung von ungefähr 20 bis 30 MVA) kann der Kurzschlußstrom langsam (in ungefähr 3 bis 5 h) auf den Nennstrom gesteigert werden. Beim Trocknen von Großgeneratoren, deren Blechpakete eine erhebliche Breite haben, ist hingegen Vorsicht geboten, weil der Dauerbetrieb im Kurzschluß für den Generator einen anormalen Belastungsfall darstellt: da im Innern des Blechpakets wegen des Fehlens der Eisenverluste keine Wärme entwickelt wird, dehnen sich die Ständerstäbe verhältnismäßig mehr als das Blechpaket im normalen Betrieb. Durch dieses betriebsfremde Wachsen und Wiederzusammenziehen (Wärmespiel) der Ständerstäbe mit ihrer Isolation entstehen Relativbewegungen in den Nuten, durch die eine Beschädigung der Stabisolation eintreten kann. Dadurch, daß beim Vortrocknen mit Luft das Blechpaket ebenso wie die Wicklung bereits gut durchgewärmt ist, wird

diese Gefahr etwas vermindert, deswegen empfiehlt es sich, beim Trocknen von Großgeneratoren den Kurzschlußstrom nicht über den 0,6fachen Nennwert zu steigern. Man beginnt beim Trocknen mit $^1/_4$ des Nennstromes und steigert ihn innerhalb von 2 bis 3 h allmählich auf ungefähr den 0,6fachen Nennwert.

Wenn die Trocknung mit dem Nennstrom erfolgt, ist die Kaltlufttemperatur durch entsprechende Einstellung des Kühlwasserzuflusses des Ringlaufkühlers auf ungefähr 35° einzuregeln. Wird mit Teilströmen getrocknet, so kann die Kaltlufttemperatur höher sein. Die von den Nutenthermometern angezeigte Wicklungstemperatur darf dabei natürlich niemals die in den Vorschriften VDE 0530, § 35, festgelegten Grenzwerte überschreiten. Ist der Generator nicht mit Nutenthermometern versehen, so sind an den Wickelköpfen sorgfältig befestigte, gegen Anblasen geschützte Thermometer mit Alkoholfüllung anzubringen, die guten Wärmekontakt mit der Wicklung haben (u. U. Stanniolumhüllung). Zweckmäßig werden dazu die Beobachtungsklappen an den Schutzschilden durch Holzrahmen mit Glasfenstern ersetzt, damit die Thermometer bei geschlossenen Klappen abgelesen werden können. Die Kühllufttemperatur kann beim Trocknen mit Teilströmen so eingeregelt werden, daß die an den Wickelköpfen gemessene Temperatur höchstens 60° C beträgt. Wenn sich bei Generatoren mit Frischluftkühlung nicht genügend hohe Trockentemperaturen erreichen lassen, können sie durch teilweises Abdecken der Eintrittsöffnungen für die Frischluft, also durch Verminderung der Kühlluftmenge, erhöht werden. Neben der Regelung der Eintrittstemperatur der Kühlluft von Maschinen mit Ringlaufkühlung kann die Trocknungstemperatur natürlich in allen Fällen durch die Regelung des Kurzschlußstromes in den angegebenen Grenzen eingestellt werden.

In Zeitabständen von 6 bis 8 h sind die Beobachtungsklappen und andere geeignete Abdeckungen im Gehäuse ungefähr $^1/_4$ h lang zu öffnen, damit die feuchte bzw. mit den Dämpfen des Lacklösungsmittels versetzte Kühlluft entweichen kann. Um währenddem das zu weite Absinken der Temperatur zu vermeiden, kann bei Maschinen mit Ringlaufkühlung der Kühlwasserzufluß entsprechend gedrosselt und bei Maschinen mit Frischluftkühlung der Lufteintrittsquerschnitt teilweise abgedeckt werden.

In einem Protokoll sind die in Abständen von 1 h laufend abzulesenden Temperaturen (Kühlluft und Kühlwasser kalt und warm, Wickelköpfe, Nuten), die Erregerströme, die Kurzschlußströme und die Isolationswiderstände — diese können in größeren Zeitabständen gemessen werden — einzutragen. Auch die Überwachung des Feuchtigkeitsgehalts der Kühlluft unter Benutzung eines geeigneten Hygrometers ist zu empfehlen. Zur Messung des Isolationswiderstandes, wozu ein zuverlässiger Isolationsmesser für eine Spannung von mindestens 1000 V benutzt wird, ist die laufende Maschine kurzzeitig zu entregen. Wenn man sich durch eine Messung mit einem hinreichend empfindlichen Spannungsmesser davon überzeugt hat, daß zwischen den Maschinenklemmen und dem Eisen keine nennenswerte Spannung auftritt, kann die Messung des Isolationswiderstandes auch bei erregtem Generator vorgenommen werden.

Während des Trockenvorgangs sinkt der Isolationswiderstand zunächst schnell auf einen Mindestwert und verharrt dort, je nach dem Feuchtigkeitsgehalt der Isolation, mehr oder weniger lange Zeit, um dann langsam wieder zu steigen. Wenn dieser Umkehrpunkt in der Kurve des Isolationswiderstandes erreicht ist, besteht die Gewähr, daß der Trockenprozeß seinem Ende entgegengeht.

Sollte sich der Trocknungsvorgang abnormal lange Zeit hinziehen, so ist bei stillgesetzter Maschine der Kurzschluß der Ständerwicklung und ihr Nullpunkt zu öffnen, und die etwa angeschlossenen Zuleitungen sind abzuschließen, und es ist nachzuprüfen, ob die Isolationswiderstände der einzelnen Phasen untereinander gleich groß sind oder ob ein Isolationsfehler in einer Phase vorliegt. Die Isolationswiderstände der etwa benutzten Zuleitungen sind außerdem für sich getrennt zu messen, da auch in diesen ein Isolationsfehler bestehen kann.

Der Trockenvorgang ist in der beschriebenen Weise so lange fortzusetzen, bis der Isolationswiderstand der Wicklung in ihrer betriebsmäßigen Schaltung im warmen Zustand mindestens 6 MΩ bei Generatoren für 6 kV Betriebsspannung und mindestens 10 MΩ bei Generatoren für 10 kV beträgt. Wenn der Isolationswiderstand der warmen Wicklung gegenüber dem kalten Zustand nur verhältnismäßig wenig sinkt, nachdem die Wicklung beim Betrieb im Kurzschluß hinreichend durchgewärmt wurde, ist das ein Beweis dafür, daß die Isolation nur wenig Feuchtigkeit aufgenommen hat. Liegt dabei der Isolationswiderstand der warmen Wicklung über dem verlangten Mindestwert, so kann auf die Fortsetzung des Trocknens verzichtet werden.

In der Sowjetunion ist man bestrebt, nach Möglichkeit auf das Trocknen der Wicklungen überhaupt zu verzichten. Durch Versuche ist dort festgestellt worden, daß das gegenseitige Verhältnis der in gewissen Zeitabständen gemessenen Isolationswiderstände einen Anhalt für den Feuchtigkeitsgehalt der Isolation gibt. Der Isolationswiderstand wird 15 und 60 s nach dem Beginn des Drehens der Kurbel des Isolationsmessers bestimmt. Für eine trockene Isolation soll das Verhältnis $R_{60} : R_{15}$ bei einer Wicklungstemperatur von 20 bis 30° C nicht weniger als 1,3 betragen. In diesem Fall kann auf das Trocknen verzichtet werden. Diese Feststellungen gelten allerdings für die in der Sowjetunion vorzugsweise verwendeten Wicklungen mit kompoundierter Isolation. Welche Nutzanwendungen sich daraus für die in der Deutschen Demokratischen Republik meist üblichen nicht kompoundierten Wicklungen ergeben, muß noch durch eingehende Versuche geklärt werden.

6.2 Läuferwicklung und Wicklungen der Erregermaschine

Beim Trocknen des Ständers werden die Läuferwicklung und die Wicklungen der Erregermaschine gleichzeitig mitgetrocknet. Wenn im Kurzschluß mit dem Nennstrom gefahren wird, beträgt der Erregerstrom ungefähr das 0,6- bis 0,7fache seines Nennwertes. Die Trocknung ist also nicht so wirksam, wie das bei der Ständerwicklung der Fall ist.

Der gesamte Isolationswiderstand des Erregerkreises kann im vollständig entregten Zustand bei laufender Maschine mit einem Isolationsmesser bestimmt werden. Bei erregter Maschine benutzt man zur Bestimmung einen Präzisionsspannungsmesser für Gleichstrom, mit dem man die Spannung an den Schleifringen und die Spannung jedes Schleifringes gegen die Welle mißt und daraus in bekannter Weise unter Berücksichtigung des inneren Widerstandes des Spannungsmessers den Isolationswiderstand des gesamten Erregerkreises berechnet.

Der Isolationswiderstand der Läuferwicklung und der Wicklungen der Erregermaschine soll im warmen Zustand mindestens je 1 bis 2 MΩ betragen. Wenn dieser Wert nach dem Trocknen der Ständerwicklung noch nicht erreicht worden ist, kann der Generator trotzdem in Betrieb genommen werden, da ja die Erregerspannung in der Großenordnung von meist nur 220 bis 250 V liegt und da bei

dem höheren Betriebsstrom [illegible] Erregerstromes die Wicklungen noch weiter austrocknen. Natürlich ist dann während der ersten Betriebstage der Isolationswiderstand des Erregerkreises laufend zu überwachen, bis ein genügend hoher Wert, der den angegebenen Mindestwert meistens weit übersteigt, erreicht ist. Sollte das nach mehrtägigem Betrieb nicht der Fall sein, so ist der Läufer bzw. die Erregermaschine nach besonderen Gesichtspunkten eingehend zu untersuchen.

Während des Trocknens von Generatoren mit Umlaufkühlung sind die Elemente des Kühlers und die Anschlußstellen der Wasserleitungsrohre sorgfältig auf etwaige Undichtigkeiten zu überwachen.

7. Betrieb mit der Leerlaufspannung

Nach beendeter Trocknung und anschließender Abkühlung wird der Generator bei offenen Klemmen langsam und vorsichtig bis zur Nennspannung erregt. Durch sorgfältiges Abhören ist zu untersuchen, ob etwa abnormale magnetische Geräusche auftreten. Die Gleichheit der Spannungen der drei Phasen ist durch eine Messung zu überprüfen.

Nachdem der Generator ungefähr $^1/_2$ h lang einwandfrei mit der Nennspannung im Leerlauf im Betrieb gewesen ist, kann er zur Ausführung der Windungsprüfung nach VDE 0530, § 52, 3 min lang mit der 1,3fachen Nennspannung betrieben werden.

8. Überprüfung und Einstellung der Schutzeinrichtungen

Von großer Wichtigkeit ist die bei der Inbetriebsetzung durchzuführende Überprüfung und Einstellung der Schutzeinrichtungen und die schriftliche Festlegung der dabei ermittelten Ergebnisse.

Der Überstromschutz, der Differentialschutz, ein etwa vorhandener Schieflastschutz bzw. eine Schieflastanzeigervorrichtung und ein bei kleinen Generatoren mit mehr als zwei Leitern je Nut mitunter vorgesehener Windungsschlußschutz (wenn zu seiner Betätigung die Generatorspannung nicht erforderlich ist) sind bereits während des Trocknens im Kurzschluß zu überprüfen und einzustellen. Für die besonders wichtige Überprüfung und Einstellung des Differentialschutzes ist in bekannter Weise der Kurzschluß einmal außerhalb und einmal innerhalb des Schutzbereiches einzulegen.

Ein etwa vorgesehener Läufererdschlußschutz bzw. eine Läufererdschluß-Anzeigevorrichtung kann schon während des Fahrens im Kurzschluß untersucht werden und ist bei höherem Erregerstrom nochmals zu überprüfen.

Die Einrichtung für die Schnellentregung wird zweckmäßig schon während des Fahrens im Kurzschluß auf ihre Wirksamkeit überprüft. Die genaue Abstimmung ist selbstverständlich erst möglich, wenn der Generator unter Spannung gesetzt werden kann.

Bevor der Generator zum erstenmal im Leerlauf erregt wird, ist eine Klemme zu erden und beim Erregen der Gestellschlußschutz zu überprüfen und einzustellen. Das hat den Vorteil, daß der Generator geschützt ist, wenn ja beim erstmaligen Erregen auf die Nennspannung ein Körperschluß eintreten sollte.

Ein etwa vorhandener Rückleistungsschutz kann erst bei der Belastung des Generators eingestellt werden.

Der Schnellschluß der Turbine, der ebenfalls zu den Schutzeinrichtungen zu rechnen ist, wird schon während des mechanischen Leerlaufes eingestellt.

9. Voraussetzungen für einwandfreies Parallelschalten

Zum Parallelschalten von zwei Wechselstromquellen sind bekanntlich folgende Bedingungen zu erfüllen:

a) gleicher Umlaufsinn der Drehfelder,
b) Frequenzgleichheit,
c) Spannungsgleichheit,
d) gleiche Lage der Spannungsvektoren der beiden Stromquellen im Augenblick des Parallelschaltens.

Über den Vergleich der Frequenzen und der Spannungen, der mit den üblichen Meßgeräten vorgenommen wird, ist nichts Besonderes zu sagen.

Zum Drehfeldvergleich und der Feststellung der Übereinstimmung der Phasenlagen durch die Synchronisiereinrichtung ist im einzelnen zu bemerken:

9.1 Drehfeldvergleich

Zum Drehfeldvergleich wird zweckmäßig ein und derselbe Spannungswandlersatz nacheinander einmal von den Sammelschienen und einmal von dem zuzuschaltenden Generator erregt und der Umlaufsinn der Drehfelder mit einem fest an diesen Wandlersatz angeschlossenen Drehfeldrichtungsanzeiger bestimmt. Stimmen die Drehfelder nicht überein, so sind die Anschlüsse zweier Phasen des in Betrieb zu nehmenden Generators an einer dafür geeigneten Stelle gegeneinander zu vertauschen, und der Versuch ist zu wiederholen.

Die der Sicherheit halber gestellte Forderung, nur einen Spannungswandlersatz zu benutzen, läßt sich ohne weiteres erfüllen, wenn, wie das fast stets der Fall ist, Doppelsammelschienen vorhanden sind, von denen ein System für den Versuch spannungsfrei gemacht werden kann.

9.2 Überprüfung der Synchronisiereinrichtung

Die vor dem erstmaligen Parallelschalten erforderliche Überprüfung der Synchronisiereinrichtung erfolgt am einfachsten und zuverlässigsten durch einen Blindversuch, der im unmittelbaren Anschluß an den Drehfeldvergleich in einem Arbeitsgang vorgenommen werden kann, ohne daß dazu ein Eingriff in die Synchronisierschaltung nötig ist oder daß zusätzliche Mittel gebraucht werden. Wenn ein spannungsfreies Sammelschienensystem zur Verfügung steht, wird dabei in folgender Weise verfahren:

Die für die Synchronisierung vorgesehenen Sammelschienen- und Generatorwandler werden durch den zugehörigen Stecker sekundär betriebsmäßig miteinander verbunden, und der Generator wird bei spannungslosen Sammelschienen und geöffnetem Schalter auf die Nennspannung erregt. Dann leuchtet die Synchronisierlampe matt, und der Nullspannungsmesser zeigt eine geringe Spannung an. Werden nun die Sammelschienen durch das Einlegen des Generatorschalters unter Spannung gesetzt, so werden die beiden Spannungswandlersätze von ein und derselben Spannung, nämlich der des Generators, erregt; die für den Synchronismus erforderlichen Bedingungen sind also für die Synchronisiereinrichtung erfüllt. Ist ihre Schaltung richtig, so muß bei der fast ausschließlich verwendeten Dunkelschaltung im Augenblick des Einlegens des Schalters der Ausschlag des Nullspannungsmessers auf Null zurückgehen und die Phasenlampe verlöschen. Entsprechend zeigt ein Synchroneskop die Einschaltbereitschaft an.

Steht kein freies Sammelschienensystem zur Verfügung und ist das dann für den Blindversuch erforderliche Abklemmen der Generatorleitungen zu umständlich, so können zur Überprüfung der Synchronisierschaltung die einander entsprechenden Sekundärklemmen der beiden Wandlersätze vorübergehend über je eine Glühlampe für 220 V miteinander verbunden werden. Diese drei Phasenlampen müssen bei richtiger Schaltung der Synchronisiereinrichtung während des Synchronisiervorgangs gleichzeitig aufleuchten und verlöschen, und zwar im gleichen Takt wie die betriebsmäßig eingebaute Phasenlampe bzw. entsprechend den Pendelungen des Nullspannungsmessers.

Mit geeigneten Hochspannungsanzeigegeräten kann durch vorübergehendes Überbrücken der einander gegenüberliegenden Klemmen des Maschinenschalters und gleichzeitiges Beobachten der Phasenlampe bzw. des Nullspannungsmessers die Schaltung ebenfalls überprüft werden.

Ist nach einem dieser Verfahren, von denen der Blindversuch in erster Linie zu empfehlen ist, die richtige Arbeitsweise der Synchronisiereinrichtung festgestellt worden, so kann der Generator in der üblichen Weise mit den Sammelschienen parallelgeschaltet und allmählich belastet werden. Wird ein Fehler festgestellt, so ist die Verdrahtung genau zu untersuchen, der Fehler zu beseitigen und der Versuch zu wiederholen.

10. Überprüfung der Schalttafelmeßgeräte

Wenn die Richtigkeit der Angaben der Schalttafelmeßgeräte nicht schon vor der Inbetriebsetzung überprüft worden ist, so ist die Überprüfung während der Inbetriebsetzung durch Vergleich mit Präzisionsmeßgeräten für Gleich- bzw. Wechselstrom durchzuführen. Dabei kann man die Richtigkeit der Übersetzungsverhältnisse der Meßwandler im allgemeinen voraussetzen. Es genügt also die Einschaltung von Präzisionsmeßgeräten auf der Sekundärseite der Wandler.

Stehen zur Überprüfung der Richtigkeit des Wirk- und Blindleistungsmessers bzw. des Leistungsfaktormessers keine Präzisionsgeräte zur Verfügung, so muß man sich wenigstens durch eine Nachrechnung des Leistungsfaktors aus den Angaben des Spannungs-, Strom- und Leistungsmessers davon überzeugen, daß kein grober Fehler vorliegt.

Um Überlastungen vorzubeugen, müssen unbedingt die Nennwerte des Ständer- und Läuferstromes auf den Skalen der Schalttafelgeräte durch rote Marken eindeutig gekennzeichnet werden.

Besonders wichtig ist dabei die Festlegung des Läufernennstromes. Auf den Leistungsschildern älterer Generatoren ist häufig der Nennerregerstrom nicht angegeben. In solchen Fällen wird oft der meist wesentlich höhere Nennstrom der Erregermaschine mit dem Nennerregerstrom des Generators verwechselt, wodurch schon in zahlreichen Fällen unzulässige Überlastungen der Läuferwicklungen mit entsprechend schweren Schäden aufgetreten sind. Wenn der Nennerregerstrom auf dem Leistungsschild des Generators nicht angegeben ist, muß er bei der Inbetriebsetzung durch eine Belastung des Generators mit den Nennwerten von Spannung, Stromstärke und Leistungsfaktor festgelegt werden.

Beim Trocknen bietet sich eine bequeme Gelegenheit zur Überprüfung der Richtigkeit der Widerstandsthermometer (Nutenthermometer, Thermometer im Blechpaket, Thermometer für die Kalt- und Warmluft) bzw. ihrer Anzeigegeräte. Wenn der Generator vor dem Trocknen genügend lange Zeit gestanden hat, so daß mit

Sicherheit ein Temperaturausgleich erreicht ist, müssen die Meßgeräte dieser Widerstandsthermometer die untereinander gleichen Temperaturen wie die eingebauten Quecksilberthermometer anzeigen. Wenn dann der Generator während des Trocknens bei nicht vom Kühlwasser durchflossenem Umlaufkühler im stromlosen Zustand so lange betrieben wird, bis mit Sicherheit der Temperaturbeharrungszustand erreicht ist, müssen die jetzt entsprechend höheren Angaben der sämtlichen Thermometer ebenfalls untereinander praktisch übereinstimmen.

11. Aufnahme der Kennlinien

Von großem Wert ist die Kenntnis der wichtigsten Kennlinien der Erregermaschine und des Generators. Die dazu erforderlichen Messungen werden zweckmäßig gleich bei der Inbetriebsetzung des Generators durchgeführt, da bei der heutigen Energielage erfahrungsgemäß kaum noch die Möglichkeit dazu besteht, wenn der Maschinensatz erst einmal für den Betrieb freigegeben worden ist. Für die Messungen sind Präzisionsgeräte zu benutzen. Dabei ist gleichzeitig die unter 10 erwähnte Nachprüfung der Schalttafelmeßgeräte vorzunehmen.

Die Leerlauf- und die Belastungskennlinie der Erregermaschine und die Leerlaufkennlinie des Generators sind bei der Nenndrehzahl und bei steigendem und fallendem Erregerstrom aufzunehmen. Dabei ist nicht die Einstellung runder Spannungswerte anzustreben, sondern es ist vielmehr streng darauf zu achten, daß der Erregerstrom nur im steigenden oder nur im fallenden Sinn geregelt wird. Wenn die Drehzahl nicht genau konstant gehalten werden kann, sind die Spannungswerte beim Aufzeichnen der Kennlinien auf die Nenndrehzahl umzurechnen.

Die Meßergebnisse sind als Kurven auf Millimeterpapier aufzutragen und zusammen mit allen Unterlagen für den betreffenden Generator sorgfältig aufzubewahren, damit sie bei etwa später auftretenden Störungen zur Verfügung stehen. Soweit die Kennlinien als Ergebnis von Prüffeldmessungen des Herstellerwerkes vorliegen, kann man sich bei den Kontrollmessungen u. U. mit Stichproben begnügen.

Folgende Kennlinien sind aufzunehmen:

11.1 Erregermaschine

11.11 Leerlaufkennlinie

Bei der Durchführung der Messungen sind die Bürsten von einem Generatorschleifring abzuheben. Bei der Nenndrehzahl ist die Abhängigkeit der Leerlaufspannung vom Erregerstrom über den gesamten Bereich des Nebenschlußreglers bis zum letzten Kontakt zu bestimmen.

11.12 Belastungskennlinie

In der betriebsmäßigen Schaltung sind bei der Nenndrehzahl über einen möglicht weiten Reglerbereich zu messen: Spannung, Erregerstrom der Erregermaschine und Erregerstrom des Generators. Zweckmäßig werden die Messungen gleichzeitig mit der Aufnahme der Kurzschluß- oder Leerlaufkennlinie des Generators vorgenommen.

11.2 Generator

11.21 Kurzschlußkennlinie

Die Kurzschlußkennlinie wird während des Trocknens des Generators aufgenommen. Zu messen ist der Kurzschlußstrom in Abhängigkeit vom Erregerstrom. Die Drehzahl braucht bei diesen Messungen nicht konstant gehalten zu werden und kann von der Nenndrehzahl abweichen.

11.22 Leerlaufkennlinie

Bei der Nenndrehzahl ist die Spannung in Abhängigkeit vom Erregerstrom zu messen. Die Drehzahl ist am Frequenzmesser zu beobachten.

Es ist wertvoll, den Verlauf der Leerlaufkennlinie bis zur ungefähr 1,5fachen Nennspannung festzulegen. Um dabei eine unnötige Beanspruchung der Wicklungsisolation zu vermeiden, können die Messungen im höheren Spannungsbereich bei entsprechend herabgesetzter Drehzahl durchgeführt und die Spannungswerte auf die Nenndrehzahl umgerechnet werden.

Zur Überprüfung der Stufung des Nebenschlußreglers sind für die einzelnen Spannungswerte die jeweiligen Reglerkontakte zu notieren.

11.23 Belastungskennlinien

Über das Verhalten eines Generators bei Belastung geben die sogenannten V-Kurven $[I = f(i_e)]$ einen wertvollen Aufschluß. Zu ihrer Aufnahme sind bei konstanter Wirkleistung zu messen: Spannung, Stromstärke, Wirkleistung, Leistungsfaktor, Erregerstrom und Frequenz. Die Kurven sind für jeweils konstante Wirkleistung von $^1/_4$, $^1/_2$, $^3/_4$ und $^4/_4$ der Nennleistung aufzunehmen. Außerdem ist noch eine Kurve für die Wirkleistung 0 (reiner Phasenschieberbetrieb) aufzunehmen, soweit dabei die Sammelschienenspannung in zulässigen Grenzen gehalten werden kann. Der Erregerstrom ist bei der Aufnahme dieser Kurven von einem Höchstwert (kurzzeitige Überlastung) bis auf den für die Stabilität des Generators gerade noch zulässigen Mindestwert (Betrieb im kapazitiven Bereich) zu senken.

Aus den bei der Belastung des Generators mit $\cos\varphi = 0$ (Betrieb als Phasenschieber) gemessenen Erregerströmen kann unter Benutzung der Leerlauf- und Kurzschlußkennlinie in bekannter Weise das Potiersche Dreieck und daraus die Streuspannung bestimmt werden.

Um die Generatoren mit Rücksicht auf den jetzt in den meisten Werken bestehenden großen Blindleistungsmangel immer mit der größten Blindleistung betreiben zu können, ist es wichtig, festzustellen, in welcher Weise die Blindleistung sich bei konstantem Erregerstrom (Nennerregerstrom) und veränderlicher Wirkleistung ändert. Zu diesem Zweck ist eine Meßreihe aufzunehmen, bei der der Erregerstrom unverändert auf den Nennwert eingestellt und die Wirkleistung vom Höchstwert (zulässige Turbinenleistung) bis auf den Wert 0 (reiner Phasenschieberbetrieb) geändert wird. Diese wichtige Kurve läßt sich auch auf zeichnerischem Wege aus der Schar der V-Kurven ableiten.

12. Erwärmungsversuch

Da die Temperatur der Wicklungen für die Betriebssicherheit und die Lebensdauer eines Generators von ausschlaggebender Bedeutung ist, empfiehlt es sich, im Anschluß an die Inbetriebsetzungsarbeiten einen einwandfreien Erwärmungs-

versuch durchzuführen, denn die übliche Messung der Temperatur der ein- und austretenden Kühlluft gibt nur einen ungefähren Anhalt, genügt aber keinesfalls für die zuverlässige Beurteilung der Erwärmungsverhältnisse.

Es sind vielmehr die Temperatur der Ständerwicklung unter Verwendung der eingebauten Nutenthermometer und die Erwärmung der Läuferwicklung durch Berechnung aus der Widerstandszunahme zu bestimmen.

Zweckmäßig wird der Erwärmungsversuch vom warmen Zustand aus begonnen, nachdem der Generator bei Belastung mit annähernd dem Nennstrom im Ständer und Läufer genügend lange Zeit im Dauerbetrieb gelaufen und die Temperaturzunahme der Kühlluft praktisch konstant geworden ist. Während des anschließenden Versuches sind nach Möglichkeit die Nennwerte der Spannung sowie des Ständer- und Läuferstromes einzustellen. Ist das nicht möglich, so sind die durch den Versuch ermittelten Erwärmungen auf die Nennwerte der Ströme umzurechnen. Die während des Versuches einmal eingestellten Stromwerte und die Temperatur der Kaltluft müssen so konstant wie irgend möglich gehalten werden und sind deshalb laufend zu überwachen bzw. einzuregeln.

Während des Versuches sind in Abständen von je $^1/_2$ h zu messen: die Temperatur der Kalt- und Warmluft, des kalten und warmen Kühlwassers, des Blechpakets und die von dem Meßgerät der Nutenthermometer angezeigten Temperaturen. Weiter ist der Widerstand der Läuferwicklung in den gleichen Zeitabständen durch die Messung des Erregerstromes und der Spannung an den Schleifringen zu bestimmen. Dazu sind die gleichen Präzisionsgeräte zu verwenden, die zur Messung des kalten Widerstandes (vgl. 3) benutzt wurden. Die Spannung ist nicht an den Schleifringbürsten, sondern unmittelbar an den Schleifringen durch Anhalten von Meßleitungen mit Spitzen oder besser mit Kontakten aus Kupfergewebe zu messen. Die mittlere Erwärmung der Läuferwicklung wird in bekannter Weise nach der in § 34 der Vorschriften VDE 0530 angegebenen Formel berechnet.

Neuerdings werden auch wieder Temperaturmeßeinrichtungen gebaut, die die unmittelbare Messung der mittleren Läufertemperatur während des Betriebes ermöglichen. Sie messen, ebenso wie die Anzeigegeräte für elektrische Ferntherm ometer (z. B. Nutenthermometer), als Quotientenmesser (Kreuzspulinstrumente) den Wicklungswiderstand und sind mit einer Temperaturskale versehen. Ihr Spannungskreis ist an die Schleifringe über besondere, nicht vom Erregerstrom durchflossene Hilfsbürsten angeschlossen. Ist ein derartiges Meßgerät eingebaut, so ist die Richtigkeit seiner Angaben während des Erwärmungsversuches zu überprüfen und nötigenfalls eine Nacheichung vorzunehmen.

Der Erwärmungsversuch wird so lange fortgesetzt, bis die sämtlichen abgelesenen Temperaturwerte und der ohmsche Widerstand der Läuferwicklung mindestens 1 h lang praktisch unverändert geblieben sind.

Für die Beurteilung der Erwärmungsverhältnisse sind die in den Vorschriften VDE 0530, § 39, für die Erwärmung und die Temperatur festgelegten Grenzwerte maßgebend.

Es konnten nur einige der bei der Inbetriebsetzung von Turbogeneratoren zu beachtenden Gesichtspunkte etwas eingehender behandelt werden. Ich hoffe aber, daß es mir gelungen ist, einen einigermaßen umfassenden Überblick über dieses wichtige Gebiet zu geben, und bin gern dazu bereit, in der Diskussion auf Einzelheiten näher einzugehen.

6.4 Durchschlagwechselspannung von Luftstrecken in Hochspannungsanlagen von 10 ··· 30 kV

Prof. Dr.-Ing. *F. Obenaus*

Für die Überschlag- und Durchschlagstellen werden zur besseren Abstufung der Isolation neuerdings keine Schlagweiten mehr, sondern Stehwechsel- und -stoßspannungen festgelegt. Für die Durchschlagwechselspannung von Luftstrecken in Anlagen und Geräten wird die Abhängigkeit der Durchschlagspannung von der Schlagweite behandelt, die in dem Schlagweitenbereich der Reihe 10 ··· 30 keine Proportionalität aufweist. Es wird untersucht, ob Verkürzungen der bisher genormten Schlagweiten möglich sind.

Einleitung

Für Überschlag- und Durchschlagstellen an elektrischen Bauelementen, Geräten und Anlagen werden neuerdings[1]) keine Schlagweiten mehr, sondern Spannungen (Stehwechselspannung, Stehstoßspannung) vorgeschrieben. Damit soll eine bessere Abstufung des Isoliervermögens der Betriebsmittel erreicht werden, außerdem wird aber auch der Weg zu raumsparenden Konstruktionen freigegeben. An Bauelementen (z. B. Isolatoren) und Geräten (z. B. Schaltern und Transformatoren) können diese Spannungen sowohl für die „Überschläge" längs der Oberfläche von Isolatoren als auch für die „Durchschläge" von reinen Luftstrecken durch Messung im Prüffeld nachgewiesen werden, nicht aber nach der bisherigen Gepflogenheit an ganzen Anlagen. Für die Projektierung, Überprüfung und den Betrieb von Anlagen müssen deshalb praktisch verwertbare Unterlagen über die Abhängigkeit der Durchschlagspannung U_d von der Schlagweite s von Luftstrecken vorliegen.

Sie lassen sich für Anlagen mit Betriebsspannungen von 10 ··· 30 kV nicht so einfach wie für höhere Betriebsspannungen (60 ··· 400 kV) schaffen, weil vielfach keine Proportionalität zwischen U_d und s besteht und U_d stark von den vielgestaltigen Formen der Metallarmaturen, die als Elektroden der Luftfunkenstrecken wirken, abhängt.

Aufgabe

Aus Wechselspannungsmessungen[2]) an den grundsätzlich wichtigen Anordnungen mit Stab- und Zylinderelektroden sowie an einigen praktischen Ausführungsformen soll für das Schlagweitengebiet, das für Reihe 10 ··· 30 in Frage

---

[1]) Vgl. VDE-Vorschrift VDE 0111/53, 0670/54.

[2]) Die Messungen wurden zum großen Teil von *J. Stenzel* im Rahmen seiner Diplom-Arbeit am Institut für Hochspannungstechnik der Technischen Hochschule Dresden durchgeführt. Für Ergänzungsmessungen und wertvolle Mitarbeit habe ich meinem Assistenten, Herrn Dipl.-Ing. *Schmidt*, besonders zu danken.

kommt, ein für technische Zwecke zugeschnittener Überblick über den Zusammenhang zwischen Durchschlagspannung und Schlagweite gegeben werden. Sodann soll die Frage behandelt werden, ob und wieweit in Innenräumen die bisher üblichen Schlagweiten von 12,5, 18 und 26 cm für 10, 20 und 30 kV verringert werden können.

1. VDE-Vorschriften

Die Schlagweiten 12,5, 18 und 26 cm gegen Erde und zwischen Leitern der alten „Leitsätze für den elektrischen Sicherheitsgrad von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber" [kurz „Sicherheitsgrad-Leitsätze" (VDE 0111/41)] sind in den überarbeiteten „Leitsätzen für die Bemessung und Prüfung der Isolation elektrischer Anlagen für Wechselspannungen von 1 kV und darüber" [kurz „Bemessungs- und Prüf-Leitsätze" (VDE 0111/53)] nicht mehr enthalten, ebenso nicht mehr in den neuen „Regeln für Wechselstrom-Hochspannungsgeräte" [kurz „Geräte-Regeln" (VDE 0670/54)]. An Stelle dieser Schlagweiten sind den Reihenspannungen Stehwechselspannungen bzw. Prüfspannungen zugeordnet worden.

Ein Mangel der „Bemessungs- und Prüf-Leitsätze" (VDE 0111/53) besteht darin, daß „Luftstrecken in Anlagen" zwischen spannungführenden Teilen gegen Erde (Erdabstände) oder gegeneinander (Leiterabstände) nicht ausdrücklich in die Isolationsgruppen A · · · D eingeordnet sind. Es ist naheliegend, Erd- und Leiterabstände in die Gruppe C einzugliedern, weil zumindest die Erdabstände sehr oft parallel zu Isolationen dieser Gruppe liegen. Dies steht auch in Einklang mit den „Geräte-Regeln" (VDE 0670/54, § 36a 3), die allerdings eben nur für Geräte, nicht für Anlagen „die Isolation leitender Teile gegen Erde und gegeneinander" in die Gruppe C einordnen. Nicht in Übereinstimmung mit den eben besprochenen VDE-Vorschriften sind die heute noch gültigen „Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber" [kurz „Errichtungsvorschriften" (VDE 0101/43)]. Sie fordern noch Mindestabstände von 12,5, 18 und 26 cm für Erd- und Leiterabstände (Abschn. F, Leitungen § 18g, Tafel) bzw. 20% höhere Abstände, wenn sie nicht an allen Stellen durch fabrikmäßig hergestellte Isolatoren gewährleistet sind.[1])

2. Durchschlagspannung und Schlagweite für Punktelektroden

Einen ausgezeichneten Einblick und Überblick geben die klassischen Untersuchungen von *Toepler* und *Weicker*[2]) an Anordnungen mit Kugeln und Spitzen. Danach ist der Verlauf der Kurve der Abhängigkeit der Durchschlagspannung U_d von der Schlagweite s [$U_d = f(s)$, Bild 1, 2] in dem für Reihe 10 · · · 30 maßgebenden Schlagweitenbereich und bei kleinen Kugeln unstetig. Es ist deutlich zwischen einem gekrümmten und einem geraden Kurventeil zu unterscheiden. Die Unstetigkeitsstellen G — immer Grenzgebiete und keine scharf festliegenden Grenzpunkte — rühren daher, daß ein Wechsel des physikalischen Durchschlagmechanismus erfolgt. Dies kann aus der Veränderung der sichtbaren Vorentladungen, aus denen der Durchschlagfunken hervorgeht, eindeutig erkannt werden. Der Verlauf des

[1]) Sie werden z. Z. gerade überarbeitet.

[2]) *Toepler, M.:* Ann. d. Physik Bd. 7 (1902) S. 479, Bd. 10 (1903) S. 730, Bd. 19 (1906) S. 191, ETZ 28 (1907) S. 998. *Weicker, W.:* Diss. Dresden (1910) S. 26, ETZ 31 (1910) S. 853, Hescho-Mitt. H. 31 (1927) S. 3.

gekrümmten Kurventeil [illegible] von G) fallt mit der Kurve für die Anfangsspannung U_a [illegible] U_a folgt der übersichtlichen, von *Schwaiger* aufgestellten Beziehung:

$$U_d = U_a + s\,\mathfrak{E}_a\,\eta. \tag{1}$$

$\mathfrak{E}_a$ Anfangsfeldstärke der Luft an der höchstbeanspruchten Stelle der Anordnung;

η Homogenitätsfaktor (nach *Schwaiger*: Ausnutzungsfaktor) der Anordnung, nur abhängig von den geometrischen Abmessungen.

Dieser gekrümmte Kurventeil ist für die technische Konstruktionsarbeit insofern nachteilig, als η nur für einfache Anordnungen (Kugeln, Zylinder) leicht zu be-

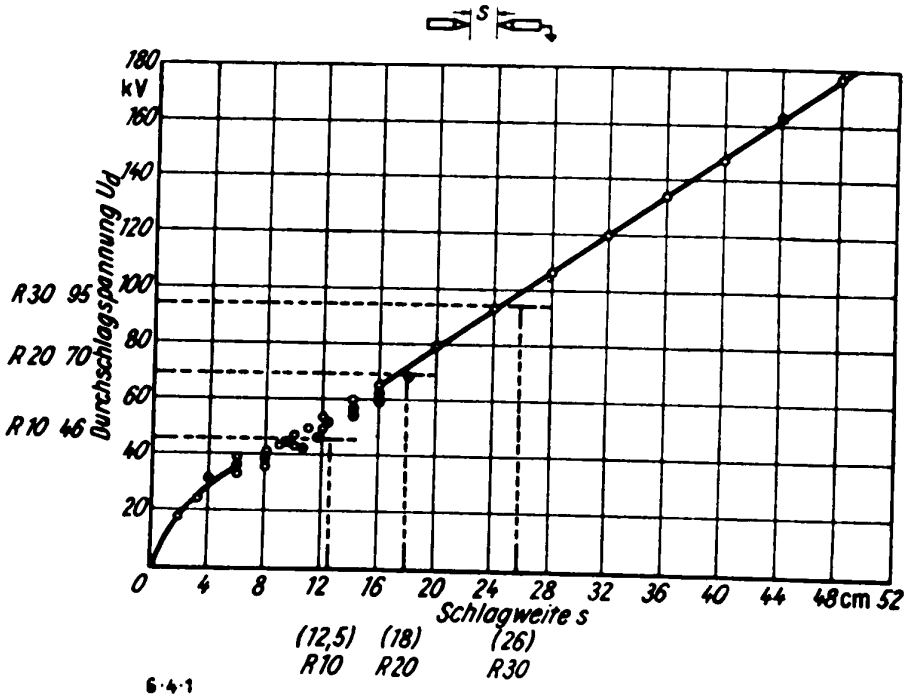


Bild 1. Durchschlagspannung Spitze-Spitze (nach Weicker). ● *neuere Messungen*

rechnen ist. Außerdem ist die auf die Schlagweite bezogene spezifische Durchschlagspannung u_d [kV/cm] keine konstante Größe — etwa wie bei großen Schlagweiten $u_d = 3{,}5$ kV/cm —, u_d sinkt vielmehr mit der Schlagweite stark ab (Bild 2, b).

Die Unstetigkeit der Kurve $U_d = f(s)$ bei G kommt folgendermaßen zustande: Bei zu kleinem η (Bild 2, a, z. B. $\eta \approx 0{,}2$), also bei sehr stark inhomogenem Feld, wird dicht vor der Elektrode zwar die Anfangsfeldstärke der Luft überschritten, die Feldstärke in weiterer Entfernung genügt aber nicht zur Ionisation. Statt eines vollständigen Durchbruchs kommt es nur zu einem Teildurchbruch der Luftstrecke, d. h. zu Vorentladungen (Glimmentladungen, Büschelentladungen) an der höchstbeanspruchten Stelle. Hier werden laufend Ladungsträger — d. h. Ionen — jeweils mit der Polarität der sprühenden Elektrode erzeugt. Sie bilden vor der Metallelektrode eine Raumladungswolke. An die Stelle der „Metallelektrode" ohne

Raumladungen im Feld ist also eine „Sprühelektrode" mit Raumladungen im Vorfeld getreten. Es ist einleuchtend, daß damit ein anderer Homogenitätsfaktor η', aber bei dieser neuartigen, Ladungsträger aussprühenden Elektrode sicher auch eine andere Anfangsfeldstärke $\mathfrak{E}'_a$ in Beziehung (1) einzusetzen sind, d. h., daß die Kurve $U_d = f(s)$ eine Unstetigkeitsstelle aufweisen muß.

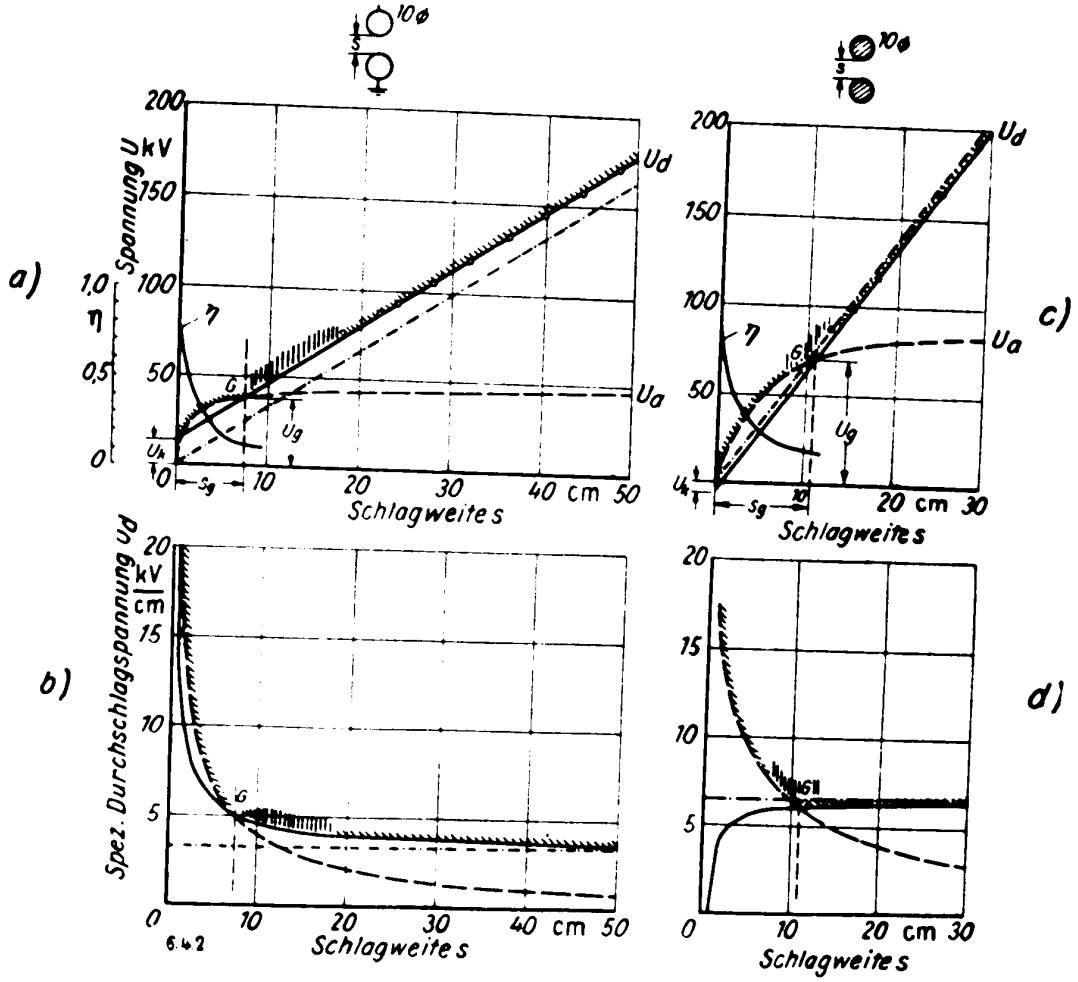


Bild 2. Durchschlagspannung zwischen Kugeln (Punktelektroden) und Zylindern (Linienelektroden)

a), c) Durchschlagspannung b), d) Spezifische Durchschlagspannung

Schwaiger weist in seiner letzten Veröffentlichung[1]) darauf hin, daß die Kurve von der Unstetigkeitsstelle G an deshalb geradlinig verläuft, weil hier das von ihm so genannte „Gesetz von der Erhaltung der Elektrodenform" gilt. Der Durchschlag erfolgt aus einem der dünnen Einzelfäden der Büschelentladung heraus. Diese Fäden sind mit Metallspitzen zu vergleichen, die auf die Ausgangs-Metallelektrode jeder beliebigen Form aufgesetzt werden. Der für das η' maßgebende Krümmungsradius ihrer Spitze ist auf jeden Fall klein gegenüber der Schlagweite,

[1]) *Schwaiger*, A.: Über elektrische Entladungen. Teil. ETZ 75 (1954) S. 293.

so daß das Feld extrem inhomogen — makroskopisch betrachtet gewissermaßen „absolut inhomogen" — ist und damit η' sehr klein, aber konstant wird. Sicherlich ist auch die Anfangsfeldstärke $\mathfrak{E}'_a$ der Luft unter diesen so eindeutig definierten Verhältnissen und damit das Produkt $(\mathfrak{E}'_a \eta')$ konstant, so daß damit eine anschauliche Erklärung für den geradlinigen Kurvenverlauf im Gebiete rechts von G gegeben ist. Die Gerade gehorcht der Gleichung

$$U_d = U_k + s \cdot \operatorname{tg}\alpha\,; \tag{2}$$

sie gilt für

$$s > s_g$$
$$U_d > U_g.$$

Führt man statt U_k s_g und U_g ein, erhält man:

$$U_d = U_g - s_g \cdot \operatorname{tg}\alpha + s \cdot \operatorname{tg}\alpha \tag{3}$$

oder

$$(U_d - U_g) = (s - s_g) \cdot \operatorname{tg}\alpha\,. \tag{4}$$

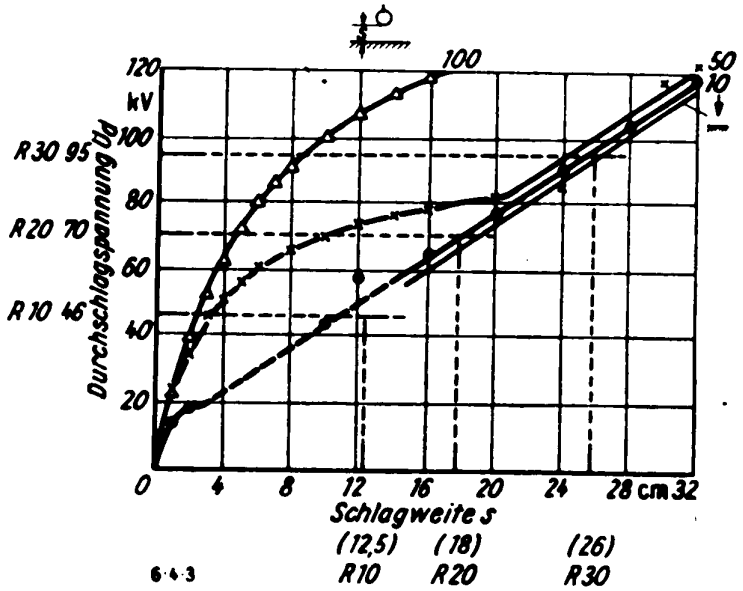


Bild 3. Durchschlagspannung Kugel-Platte (d = 3, 10, 23, 24 mm) (nach Weicker)

Die spezifische Durchschlagspannung u_d ergibt sich aus (1) zu:

$$u_d = \frac{U_d}{s} = \operatorname{tg}\alpha + \frac{U_k}{s}. \tag{5}$$

u_d nimmt also mit s nur noch wenig ab und strebt dem bekannten Endwert Bild 2, b) zu:

$$u_d = 3{,}5 \text{ kV/cm}.$$

Während die Elektrodenform, d. h. ihre Krümmung, unterhalb der Unstetigkeitsstelle G einen großen Einfluß auf U_d hat, ist dies oberhalb von G nur noch viel weniger der Fall. Dies geht sowohl aus Messungen von *Weicker* an Kugeln als

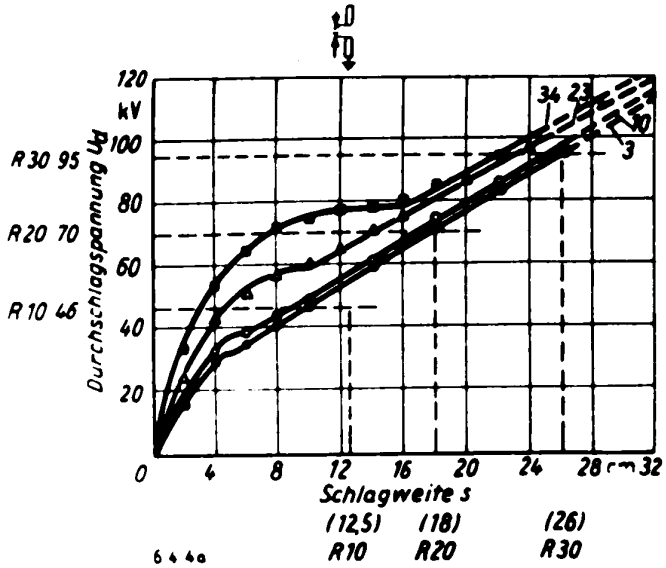


Bild 4a. Durchschlagspannung Rundstäbe (d = 3, 10, 23, 24 mm)

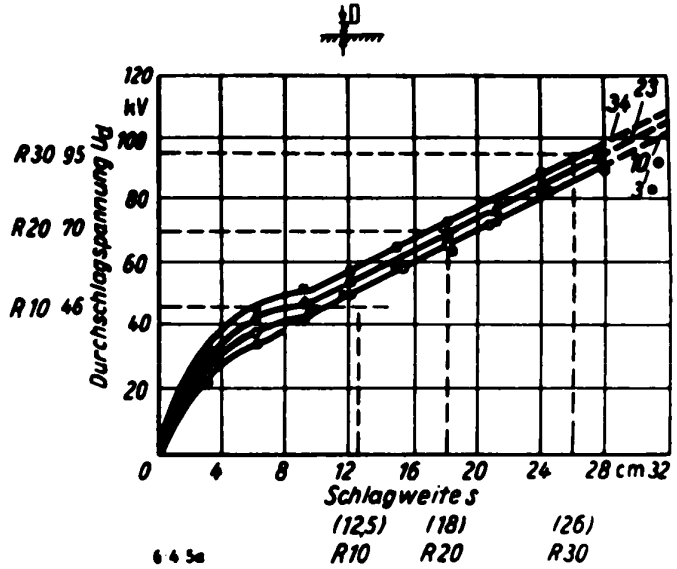


Bild 5a. Durchschlagspannung Rundstab-Platte (d = 3, 10, 23, 24 mm)

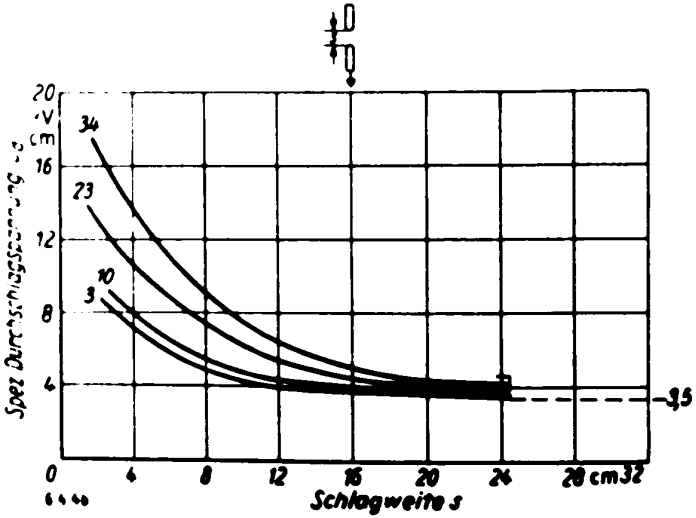


Bild 4b. Spez. Durchschlagspannung Rundstäbe (d = 3, 10, 23, 24 mm)

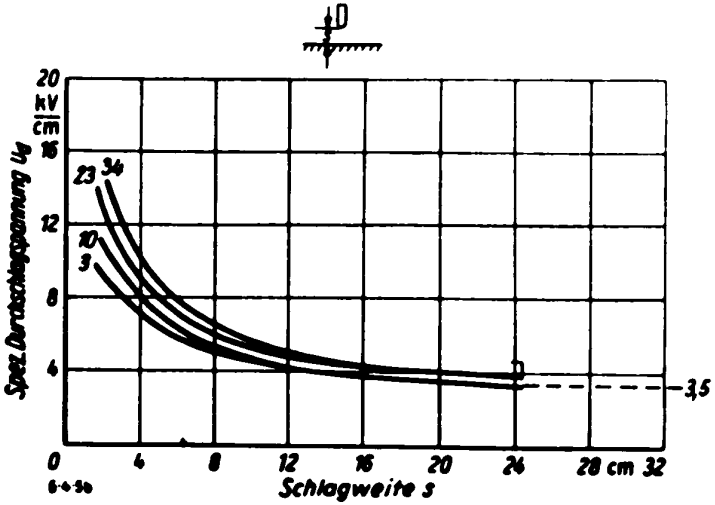


Bild 5b. Spez. Durchschlagspannung Rundstab-Platte (d = 3, 10, 23, 24 mm)

auch aus den neuerlichen Messungen an Rundstäben (mit kugeligem Ende)[1]) hervor (Bild 3, 4 und 5).

Die Geraden durch die Grenzpunkte *G* verlaufen parallel und sind mit zunehmendem Elektrodendurchmesser nur wenig nach oben verschoben. Zwischen Rundstäben (Bild 4) erfolgt bei gleicher Schlagweite und gleicher Krümmung der Durchschlag bei höherer Spannung als bei der Anordnung Rundstab-Platte (Bild 5). Der Unterschied ist wieder im Gebiet der gekrümmten Kurven wesentlich größer als in dem der Geraden. Die Kurven lassen außerdem deutlich erkennen, ob bei den für die Reihenspannungen 10, 20 und 30 kV festgelegten Prüfspannungen von 42, 64 und 86 kV und den 10% höher anzunehmenden Durchschlagspannungen von 45, 70 und 95 kV gegenüber den bisher vorgeschriebenen Schlagweiten eine Verkürzung möglich ist.

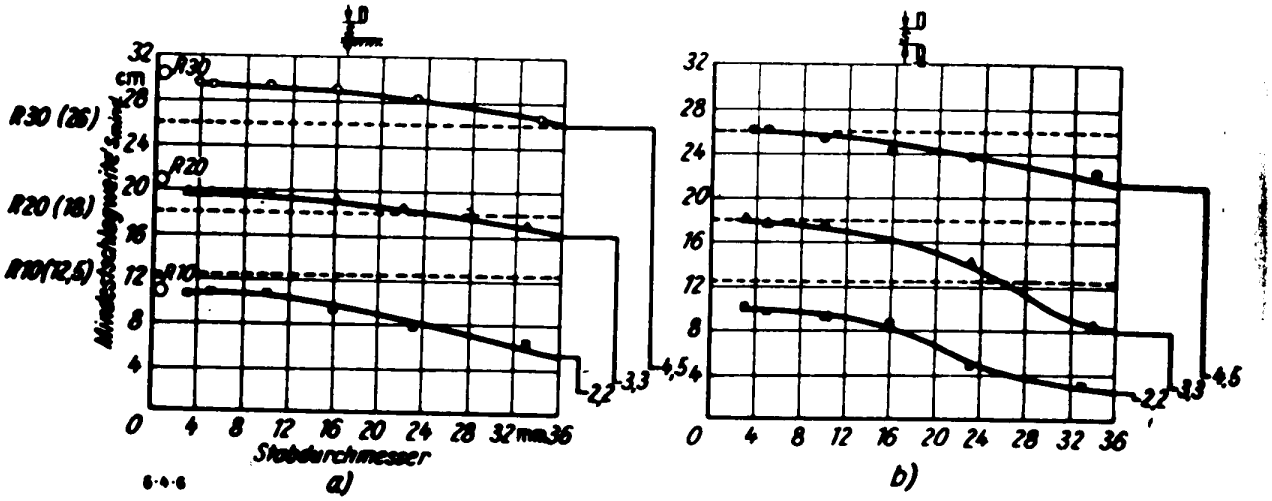


Bild 6. Mindestschlagweiten Rundstab–Platte, Rundstäbe

— — — Mindestschlagweite, alt (VDE 0111/XI. 41); ○ Mindestschlagweite für Stehstoßspannung (VDE 0111/53) nach *Crämer*

Die aus den Messungen an Rundstäben abgeleiteten Kurven über die Mindestschlagweiten (s_{mind}), abhängig von dem Stabdurchmesser (Bild 6), vermitteln eine gute Übersicht. Bei der Anordnung Rundstab-Platte (Erdabstände) (Bild 6, a) kann *s* nur bei R 10 und auch dann nur bei großem *d* wesentlich verkürzt werden. Zwischen Rundstäben gegeneinander (Leiterabstände) (Bild 6, b) ist bei großem *d* bei allen drei Reihenspannungen Verkürzung zulässig, bei R 10 auch bei kleinem *d*. Wichtig für praktische Schlußfolgerungen ist, daß nur bei wenig gekrümmten, also großflächigen Elektroden an eine Schlagweitenverkürzung zu denken ist. Solche Elektroden benötigen selbst Raum und heben die Einsparung durch Verkürzung der Schlagweite wieder auf. Ein wirtschaftlicher Erfolg durch Schlagweitenverkürzung mit Hilfe von großflächigen Armaturen mit großen Abmessungen ist also nur dann zu erwarten, wenn die Elektroden bereits aus anderen Gründen, z. B. aus mechanischen oder technologischen, unumgänglich gewisse Mindest-

[1]) Die angegebenen Meßpunkte sind jeweils die tiefsten Werte einer Meßreihe mit 25 Durchschlägen.

abmessungen besitzen müssen (z. B. Maße der Stützerköpfe, gegeben durch Einkittstelle).

Einen Vergleich der an den Rundstäben gefundenen Ergebnisse mit praktischen Elektrodenformen lassen die Messungen an Stützerköpfen zu (Bild 7). Die zylindrischen Kappen (DIN 48100) sind etwa 30 bis 32 mm hoch und haben einen Durchmesser von 60 bis 75 mm. Wie Bild 7 zeigt, stimmt die Kurve für die Stützerköpfe der Reihe 30 nahezu mit der für die Rundstäbe $d = 34$ mm (Bild 4) überein.

Durch einige Stichprobenmessungen müßte also für gewisse, praktisch wichtige Konstruktionsformen jeweils der Durchmesser einer äquivalenten Kugel oder eines

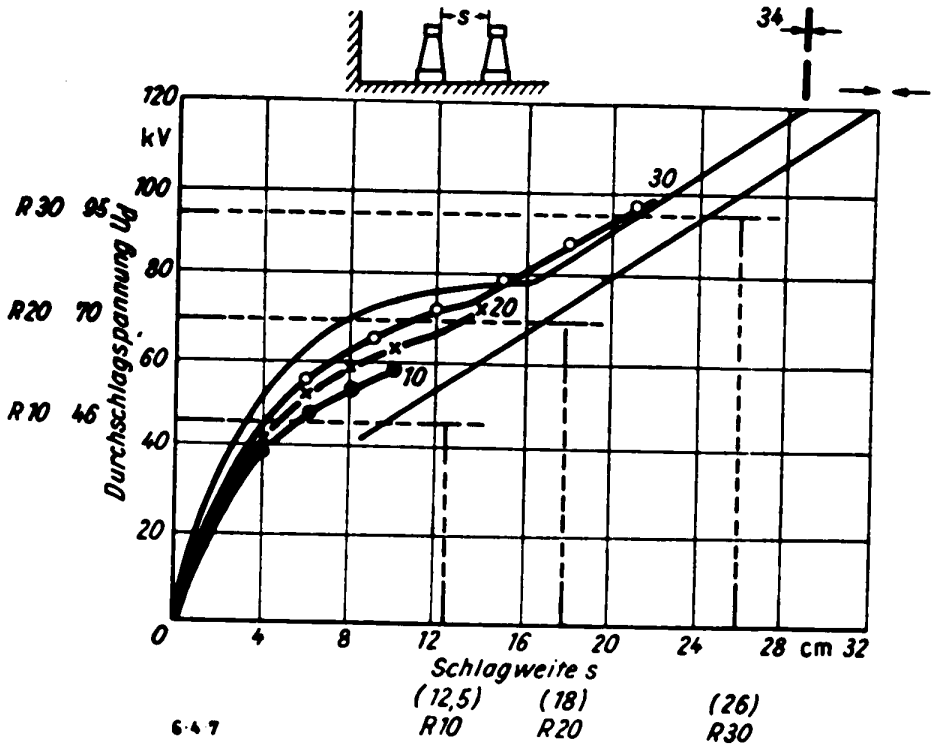


Bild 7. Durchschlagspannung Stützerköpfe

Rundstabes bestimmt werden. Sodann könnten aus den Werten für die idealisierten Elektrodenanordnungen (Kugel, Rundstab) Schlüsse auf die praktisch vorliegenden Verhältnisse gezogen werden.

3. *Durchschlagspannung und Schlagweite für Linienelektroden*

Rundschienen. Die bisher betrachteten Elektrodenformen und Anordnungen waren dadurch gekennzeichnet, daß die Stelle höchster Feldstärke auf der Elektrodenoberfläche im wesentlichen punktförmig war (Kugel, Rundstab, Stützerkopf usw.). Wir wollen sie analog den Punktladungen als „Punktelektroden" bezeichnen. In den Sammelschienenanlagen spielen daneben langgestreckte Elektroden, im Idealfalle parallele Zylinder, eine Rolle, bei denen die Stelle höchster Feldstärke eine Linie bildet, die als „Linienelektrode" darstellen. Vergleicht man

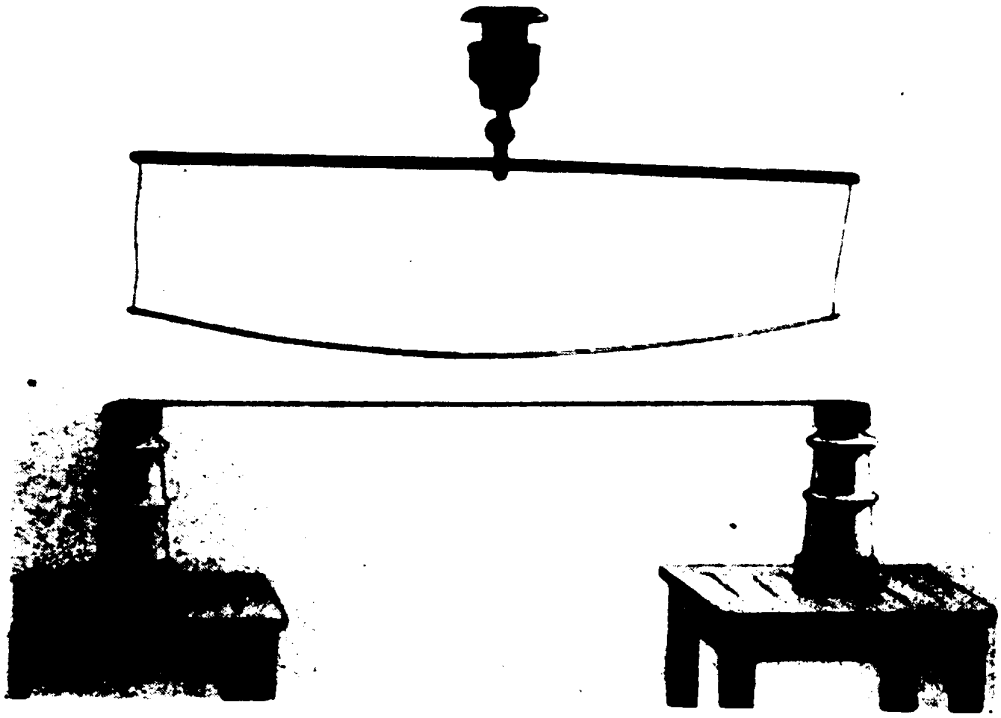


Bild 8. Rundschienen

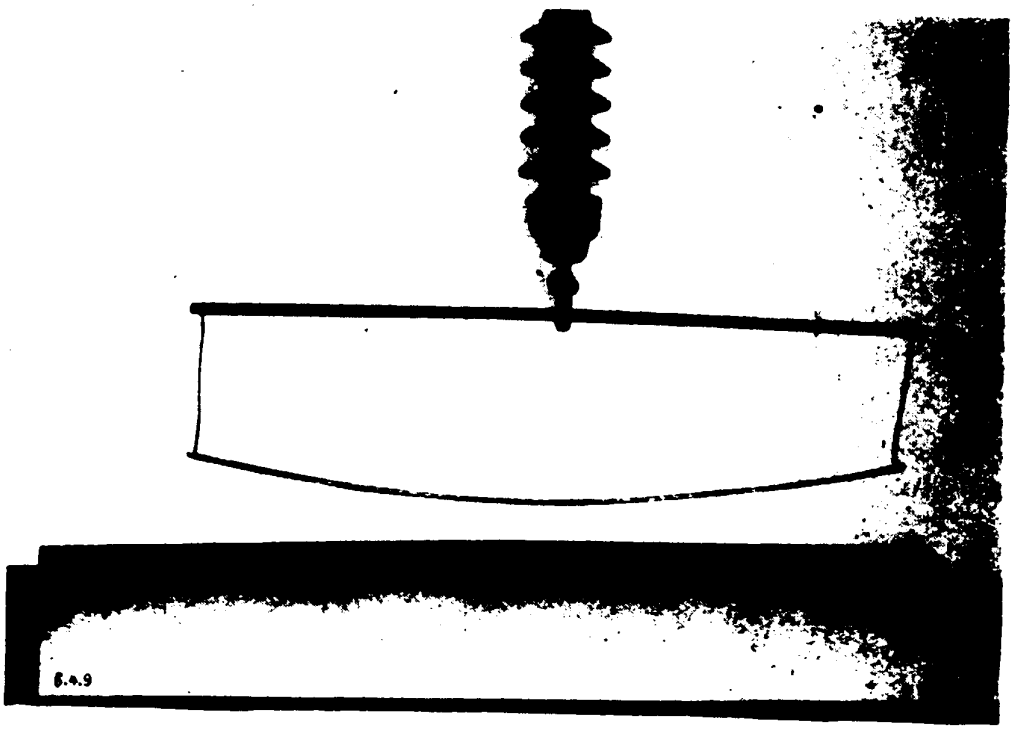


Bild 9. Rundschiene-Platte

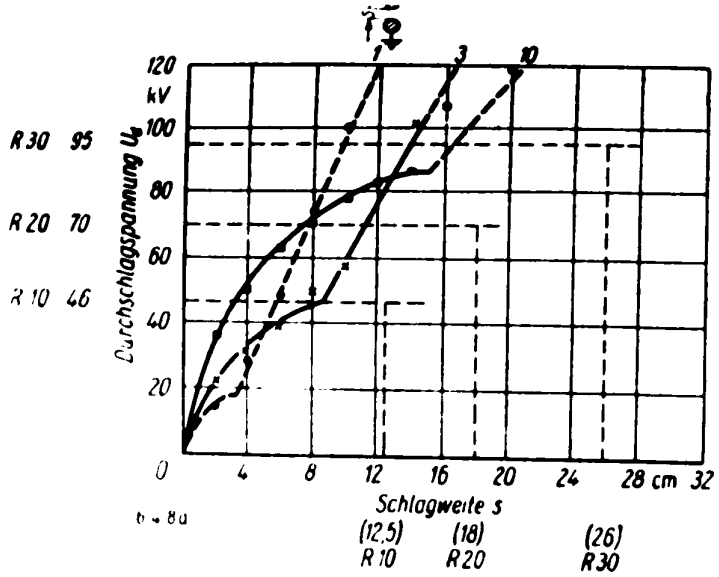


Bild 8a. Durchschlagspannung Rundschienen (d = 3, 10 mm)

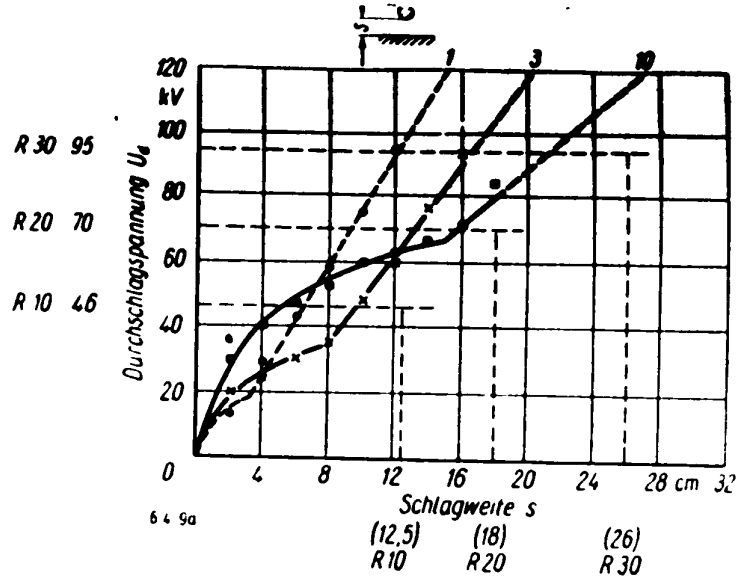


Bild 9a. Durchschlagspannung Rundschiene-Platte (d = 3, 10 mm)

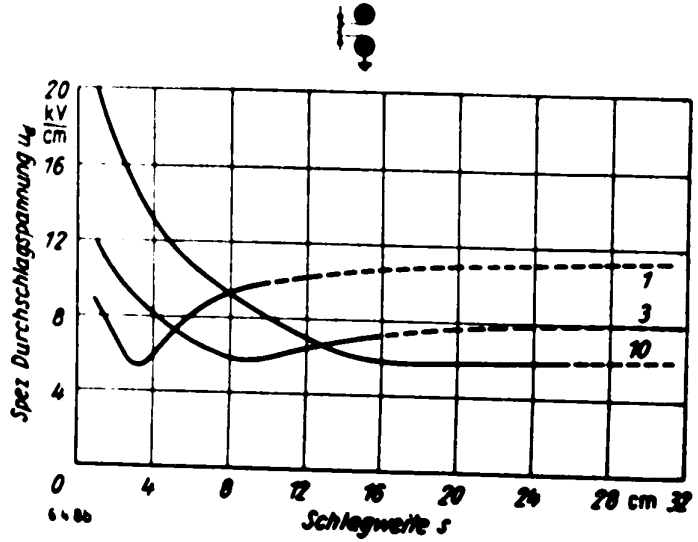


Bild 8b. Spez. Durchschlagspannung Rundschienen (d = 3, 10 mm)

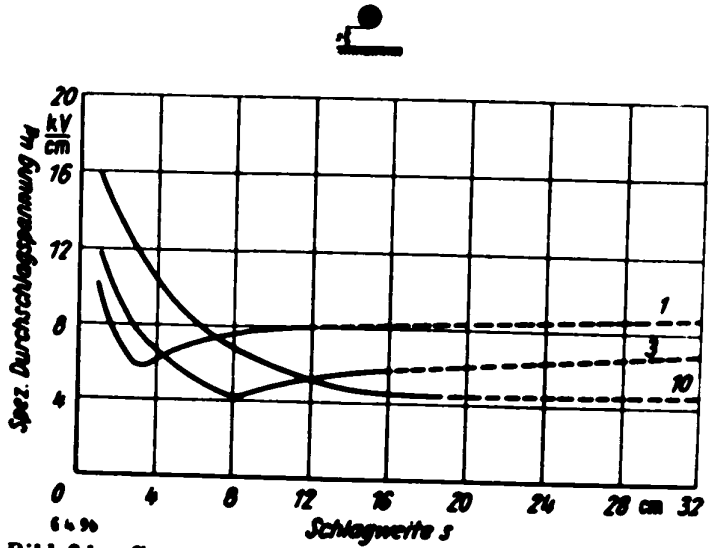


Bild 9b. Spez. Durchschlagspannung Rundschiene-Platte (d = 3, 10 mm)

die Funktion U_d [illegible] Kugelschiene $d = 10$ mm, mit der entsprechenden Kurve für eine Kugel gleicher Krümmung (Bild 2), so erkennt man zunächst in beiden Fällen den gleichen unstetigen Kurvenverlauf. Im Falle der Linienelektrode liegt U_d infolge des größeren Homogenitätsfaktors η bei gleichem s beträchtlich höher als bei der Punktelektrode. Auffällig ist aber vor allen Dingen der steilere Anstieg der Geraden. Sie schneidet auf der Ordinatenachse die Strecke $-U_k$ ab. Dies führt dazu, daß u_d ein Minimum durchläuft — im Beispiel für $d = 10$ mm sehr schwach — und den Endwert für u_d nicht von oben her wie bei den Kugeln, sondern von unten her anstrebt. Wir unterscheiden also für u_d ein Gebiet, in dem es mit wachsendem s stark abnimmt, und ein zweites, in dem es schwach ansteigt oder praktisch konstant bleibt.

Dieser grundsätzliche Verlauf der Kurve gilt für die verschiedenen Zylinderdurchmesser (Bild 8, 8a, 8b, 9, 9a, 9b).

Bei Rundschienen $d = 10$ mm tritt allerdings im Schlagweitengebiet, das für die Reihe 10 ··· 30 in Frage kommt, der gerade Kurventeil gar nicht mehr in Erscheinung. Lediglich bei der Anordnung Schiene-Platte, also bei Erdabständen, spielt er für die Reihe 30 eine Rolle.

Eine Erklärung für die größere Neigung der Geraden gegenüber der bei Punktelektroden läßt sich für den Grenzfall eines sehr dünnen Zylinders, etwa eines 1 mm dicken Drahtes, am leichtesten geben. Wie bei den Punktelektroden erfolgt bei Schlagweiten oberhalb der Grenzschlagweite s_g, d. h. dann, wenn ein genügend inhomogenes Feld (η sehr klein) vorliegt, Erzeugung von Ladungsträgern und Raumladungen. Da die Schlagweite sehr groß gegenüber dem Krümmungsradius der sprühenden Elektrode ist, kann gleichmäßige Ladungs- und damit Feldstärkeverteilung am gesamten Drahtumfang angenommen werden. Die Raumladungswolke umgibt also die Metallelektrode wie eine gleichmäßig dicke Hülle oder Haut. Sie hat, wie die Metallelektrode, Zylinderform, allerdings ist der Zylinderdurchmesser größer. Der Homogenitätsfaktor wird besser als bisher ohne Raumladung. Nach dem von *Schwaiger* aufgestellten Gesetz von der Erhaltung der Elektrodenform wächst mit zunehmendem s der Durchmesser der Sprühelektrode gerade so, daß das Produkt $\mathfrak{E}'_a \eta'$ immer konstant bleibt. Damit wird die Durchbruchspannung bei Sprühentladungen auch bei diesen Sprühelektroden eine Gerade.

Der Unterschied gegenüber den vorher angestellten Betrachtungen an den Punktelektroden besteht darin, daß hier bei dem dünnen Draht mit Glimmhaut nicht eine von der Metallelektrode verschiedene Elektrodenform unabhängig von der Schlagweite erhalten bleibt, sondern die Form der Ursprungsmetallelektrode selbst. Die Sprühelektrode behält also die Zylinderform.

Zwischen dem Grenzfall des dünnen Drahtes mit Glimmhaut und dicken Zylindern mit Glimmlinie oder mehr oder weniger breitem Glimmstreifen liegt ein Übergangsgebiet, in dem die Neigung der Geraden stetig, bis auf die Neigung bei Punktelektroden abnimmt. Diese Abnahme kommt dadurch zustande, daß die Raumladungswolke die Ursprungselektrodenform immer mehr verändert, je ungleichmäßiger die Feldliniendichte am Elektrodenumfang wird.

Besonders erwähnenswert ist, daß sich bei den Zylinderelektroden kleinen Durchmessers die u_d-Kurven kreuzen. Es lassen sich also in gewissen Schlagweitengebieten, die allerdings für die Praxis kaum in Frage kommen werden, mit kleinerem Schienendurchmesser höhere Durchschlagswerte erzielen als mit Schienen großen Durchmessers (z. B. $d = 3$ und $d = 10$ mm im Gebiet oberhalb $s = 13$ cm).

Der Vollständigkeit halber ist darauf hinzuweisen, daß im Schlagweitengebiet, für die Betriebsspannungen von 10 ··· 30 kV, die U_d-Kurven der Linienelektroden im geraden Teil zwar größere Neigungen zeigen als Punktelektroden. Nach Überschreiten einer kritischen Schlagweite aber erfolgt auch in den Fällen, wo bei kleinem s die „Glimmhaut" auftritt, schließlich der Durchschlag aus der Büschelentladung heraus (2. Unstetigkeitsstelle), so daß dann ebenfalls die bereits oben erwähnte geringste Neigung von $u_d = 3{,}5$ kV/cm gilt.

Die Übersicht (Bild 10) über die Abhängigkeit der erforderlichen Mindestschlagweiten vom Schienendurchmesser zeigt ein Ergebnis, das stark von dem an Punktelektroden gewonnenen abweicht.

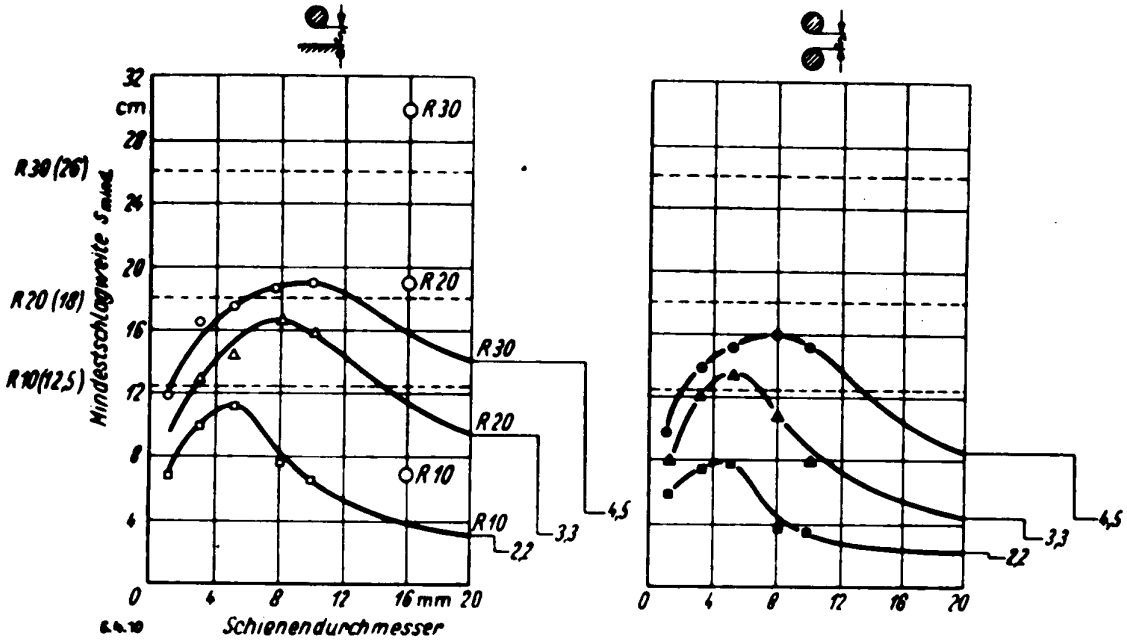


Bild 10. Mindestschlagweite Rundschiene-Platte, Rundschienen

Während dort bei den Erdabständen nur bei Reihe 10 Verkürzungen gegenüber der bisher festgelegten genormten Schlagweite möglich erschienen, könnten hier in allen Fällen wesentliche Verringerungen der Schlagweite zugelassen werden.

Flachschienen. Einige Messungen an Flachschienen geben einen Begriff davon, wie groß etwa der äquivalente „Rundschienen-Durchmesser" für eine Flachschiene bestimmter Abmessung ist. So liegt die U_d-Kurve für Flachschienen 60×10, die mit der Breitseite gegeneinander liegen, dicht bei der Kurve für Rundschienen $d = 10$ mm (Bild 11a, 11b). Flachschienen gleicher Abmessungen, die jedoch mit der Schmalseite gegeneinander stehen, nähern sich in ihrem Verhalten mehr der Spitzenfunkenstrecke (Bild 12a, 12b). Eine Kombination aus Linien- und Punktelektrode (Bild 13a, 13b), wie sie etwa zwischen Schienenträgern mit eingebauter Schiene vorliegt, zeigt, daß der Schienenträger mit seinem sehr stark inhomogenen Feld die günstige Wirkung der Linienelektrode, d. h. also der Flachschiene, aufhebt. Lediglich bei größeren Schlagweiten, also bei Betriebsspannungen

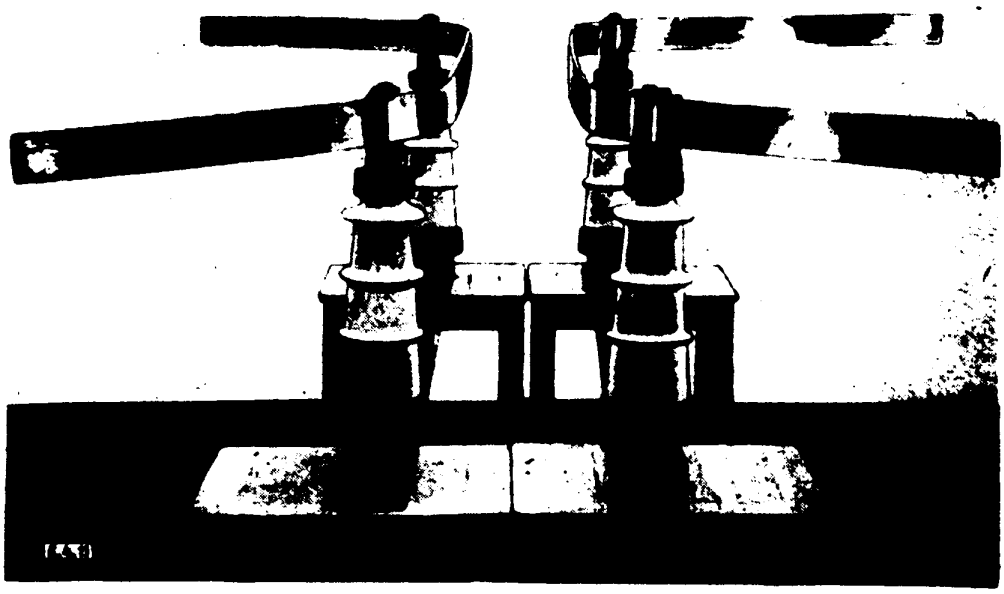


Bild 11. Flachschienen (Breitseite)

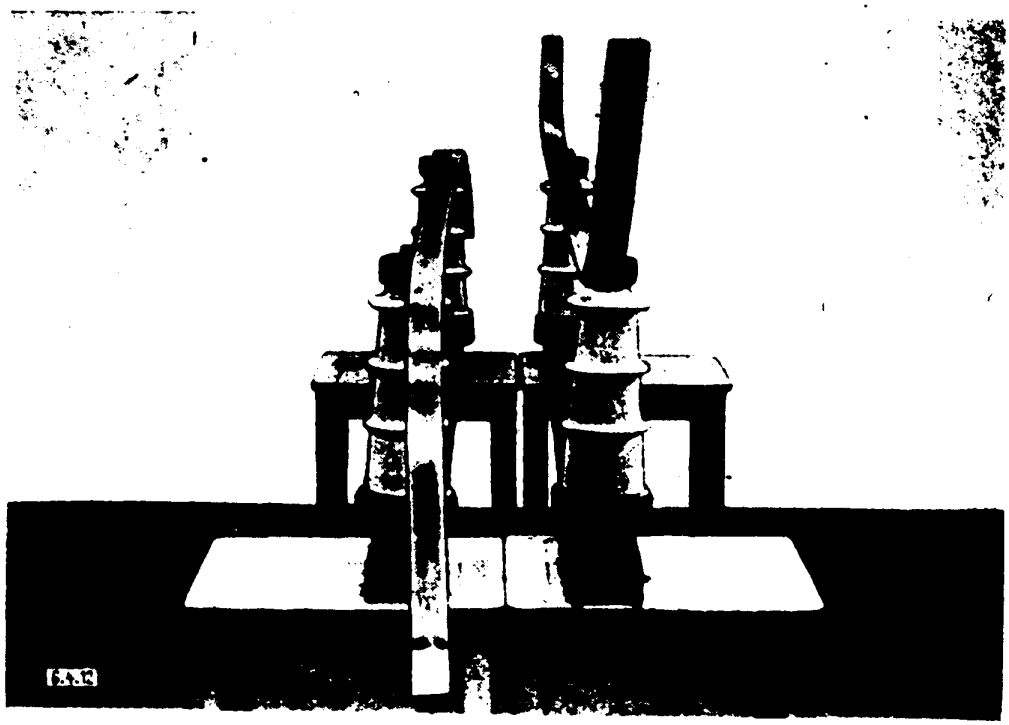


Bild 12. Flachschienen (Schmalseite)

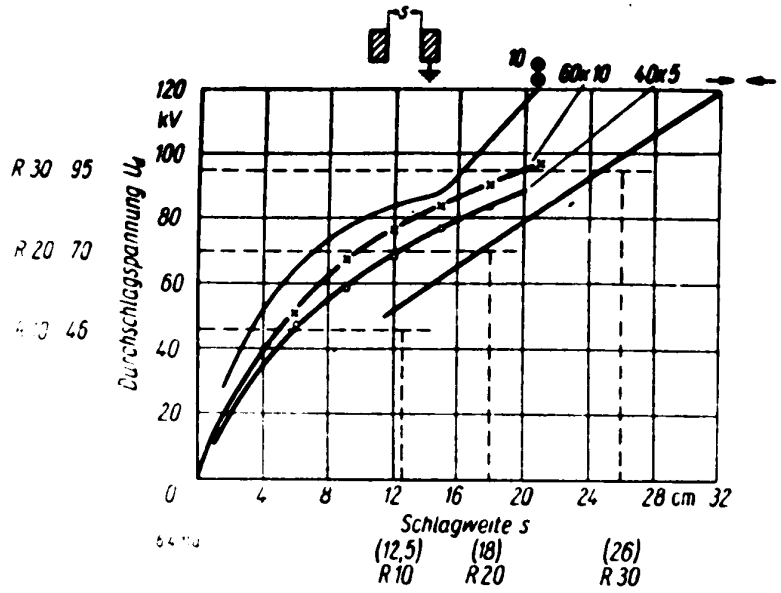


Bild 11a. Durchschlagspannung Flachschienen (Breitseite), 60×10, 40×5

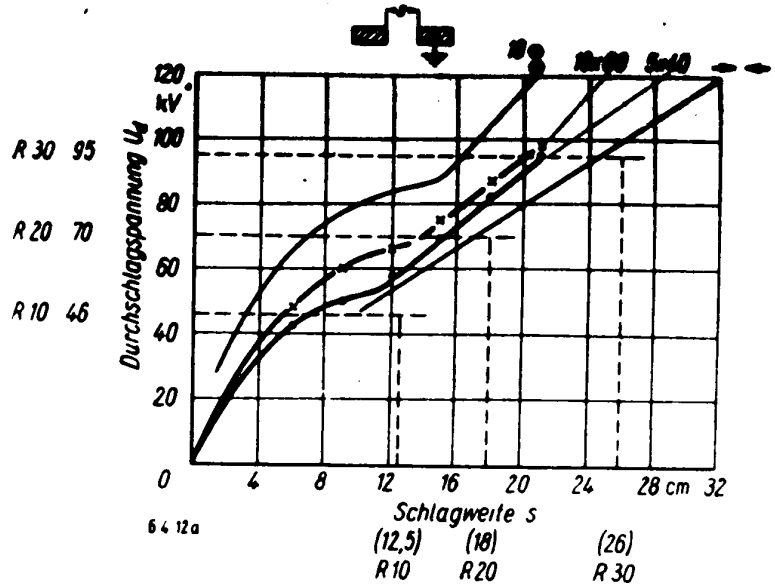


Bild 12a. Durchschlagspannung Flachschienen (Schmalseite), 5×40, 10×60

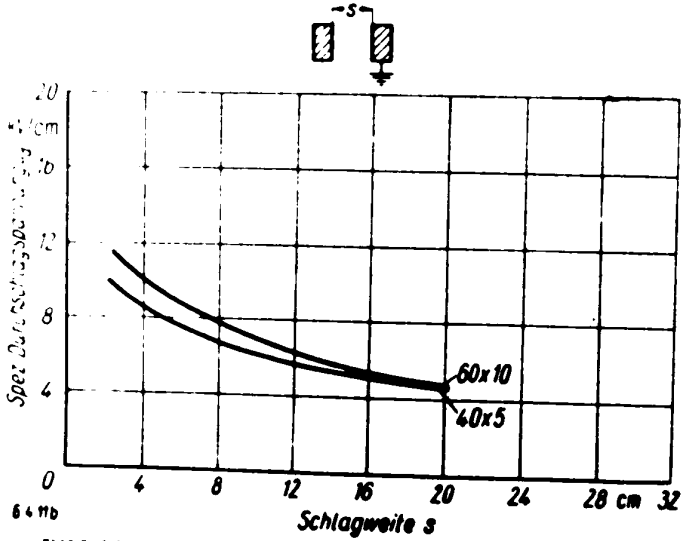


Bild 11b. Spez. Durchschlagspannung Flachschienen (Breitseite), 60×10, 40×5

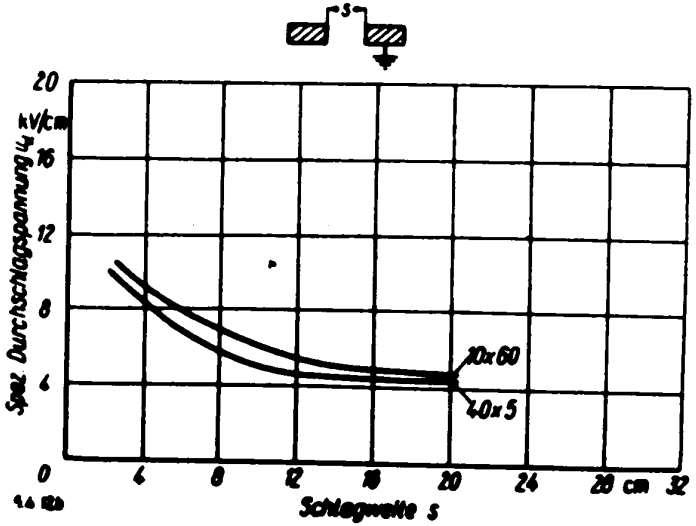


Bild 12b. Spez. Durchschlagspannung Flachschienen (Schmalseite), 5×40, 10×60

von 20 und 30 kV [illegible] einen Anstieg der Geraden mit sich, der steiler ist als der bei reiner Spitzenfunkenstrecke. Es wäre also anzustreben, die Schienenträger-Konstruktion in bezug auf das elektrische Feld günstiger zu gestalten.

4. *Mindestschlagweite nach der Stehwechsel- und Stehstoßspannung*

Die Kenntnis der Stehwechsel- bzw. Durchschlagwechselspannung (U_{st}, U_d) einer Anordnung allein genügt nicht, um endgültige Festlegungen bezüglich der Mindestschlagweite zu treffen. Dazu müssen außerdem die Steh- bzw. Durch-

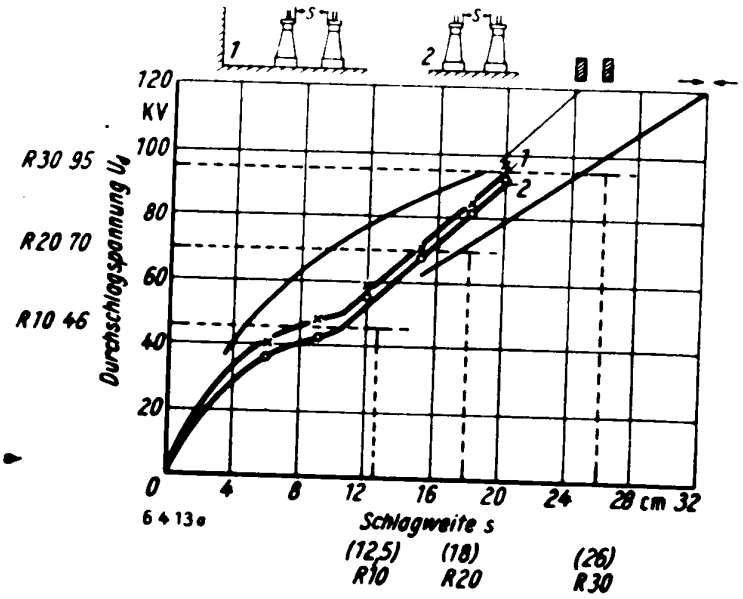


Bild 13 a. Durchschlagspannung Schienenträger mit Schiene

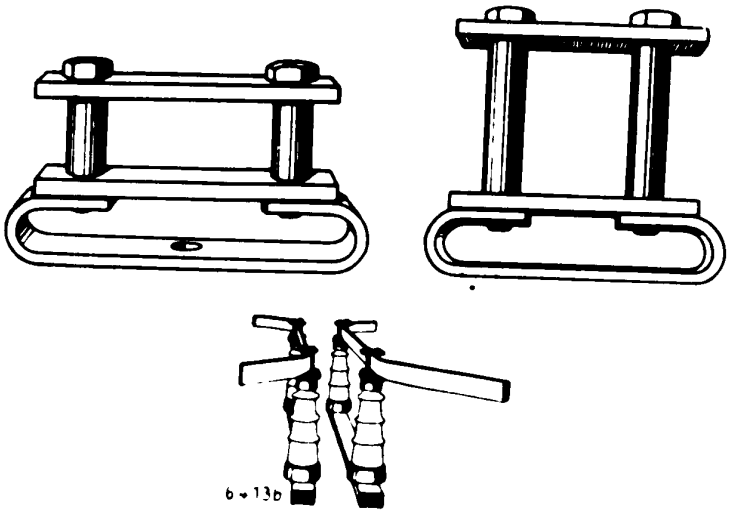


Bild 13 b. Flachschienen (Breitseite) mit Schienenträger

schlagstoßspannungen ($\underline{U}'_{st}$, $\underline{U}'_d$) herangezogen werden, die wir hier nicht behandelt haben. In einer soeben erschienenen Veröffentlichung von *Crämer*[1]) werden die Mindestschlagweiten angegeben, die aus den festgelegten Stehstoßspannungen von 80, 125 und 170 kV abgeleitet sind. Da für die Anordnung Rundschiene-Platte d = 16 mm die Mindestschlagweiten auch für Wechselspannung vorliegen, ist ein

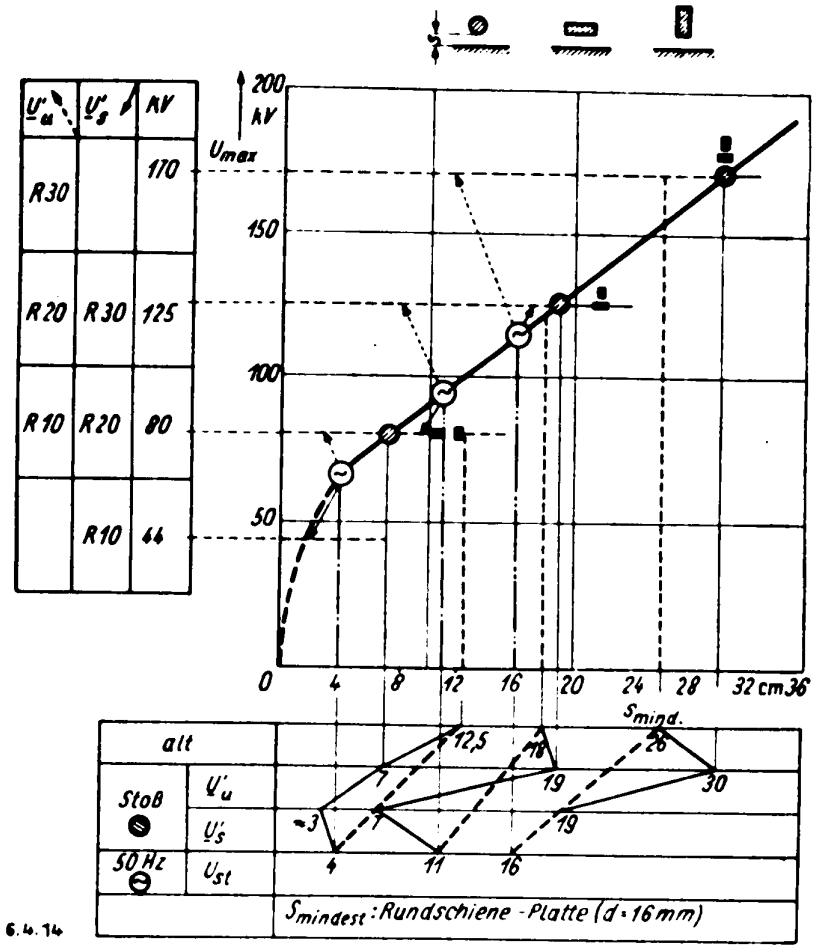


Bild 14. Mindestschlagweiten für Stehstoßspannungen nach Crämer

Vergleich möglich (Bild 14). Nach den Messungen von *Crämer*[2]) ist eine Verkürzung der Schlagweite gegenüber der bisher genormten zunächst nur bei der Reihe 10 möglich. Bei den Reihen 20 und 30 muß sie beibehalten bzw. bei Reihe 30 eher noch erhöht werden. Bei Reihe 10 allerdings könnte die bisherige Schlagweite von 12,5 cm bei Rundschienen auf 7 cm herabgesetzt werden. Die Verkürzungs-

[1]) *Crämer, R.*: Versuche zur Feststellung der Schlagweiten in Mittelspannungsanlagen. ETZ 76 (1955) S. 190.

[2]) *Crämer* gibt zu den Meßergebnissen an den Sammelschienen auch die Meßwerte für die Anordnung Spitze-Platte an. Es ist auffällig, daß diese Werte im Vergleich zu den Spitze-Platte-Werten (50% Stoßüberschlagwerte der Anordnung nach *Weicker-Jacottet*, ETZ 61 (1940) S. 565) sehr hoch liegen (vgl. Bild 14).

möglichkeiten [illegible] Trägt man in das Diagramm (Bild 14) die Mindestschlagweiten, die sich aus der Durchschlag-Wechselspannungsmessung ergeben, so erkennt man, daß die diesen Mindestschlagweiten entsprechenden Stoßspannungen viel zu niedrig sind. Der untere Isolationspegel der Stehstoßspannung ($\underline{U}'_u$), wie er in VDE 0111 festgelegt ist, scheint also gar nicht auf die Stehwechselspannung der gleichen Vorschrift abgestimmt zu sein. Dies ist wohl auch der Grund dafür, daß in den VDE-Vorschriften darauf hingewiesen wird, daß in Innenraumanlagen statt des unteren Isolationspegels $\underline{U}'_u$ die Spannung für den Schutzpegel $\underline{U}'_s$ eingesetzt werden kann. Berücksichtigt man dies, so liegen die aus der Wechselspannung abgeleiteten Mindestschlagweiten bei Reihe 10 und 20 höher als es die Stehstoßspannungen verlangen. Bei Reihe 30 müßte die Schlagweite etwa von 16 auf 18 cm erhöht werden. Da die Absicht besteht, den Schutzpegel an die in Vorbereitung befindlichen Normen der IEC (International Elektrotechnical Commission) anzugleichen, ist damit zu rechnen, daß die Schutzpegel $\underline{U}'_s$ heraufgesetzt werden. Das hieße also, daß eine Annäherung an die aus den Wechselspannungsschlagweiten abgeleiteten Werte erfolgt.

Das Beispiel sollte nicht dazu dienen, endgültige Werte festzulegen, sondern dazu, einen Weg zu zeigen, wie bei der gegenseitigen Abstimmung der Wechsel- und Stoßspannungswerte vorgegangen werden könnte.

Zusammenfassung

Die Vielzahl der Elektroden-Anordnungen läßt sich in zwei große Gruppen zusammenfassen:

Punktelektroden (Stäbe, Spitzen),
Linienelektroden (Rund- und Flachschienen).

Die Linienelektroden sind elektrisch günstiger als Punktelektroden. Bei der Konstruktion und Projektierung sind die letzteren soweit als möglich zu vermeiden. Sowohl bei den Punkt- als auch bei den Linienelektroden sind die bipolaren Anordnungen mit zwei Sprühelektroden (Stab-Stab, Schiene-Schiene) günstiger als diejenigen mit nur einer Sprühelektrode (Stab-Platte, Schiene-Platte). Die ersteren treten meist zwischen spannungführenden Leitern in Erscheinung (Leiterabstände), die letzteren zwischen spannungführenden Teilen und dem geerdeten Fußboden bzw. der geerdeten Wand (Erdabstände).

Bei den Punktelektroden ist eine Schlagweitenverkürzung gegenüber den bisherigen Werten im wesentlichen nur bei gut abgerundeten ($d = 30$ mm), also großflächigen Armaturen, d.h. bei Armaturen mit großen Abmessungen möglich (z.B. bis zu 70% bei Stab-Stab R 10). Im Falle Stab-Platte ist auch bei guter Abrundung nur bei Reihe 10 eine Schlagweitenverkleinerung zulässig.

Bei den Linienelektroden könnte bei den technisch wichtigen Schienendurchmessern ($d = 10$ bis 20 mm) die Schlagweite beträchtlich verkürzt werden (z. B. R 10, $d = 10$ mm, Stab-Platte um 50%, Stab-Stab um 70%). Voraussetzung ist hierbei allerdings, daß der z. Z. noch gültige untere Isolationspegel herabgesetzt wird.

Mit diesen Betrachtungen sollte dem Konstrukteur und der Projektierung ein Überblick über das Durchschlagverhalten der vielgestaltigen technischen Ausführungsformen gegeben werden. Die Meßwerte können als Bemessungsunterlagen dienen. Sie müssen allerdings in bezug auf Elektrodenformen und Abmessungen

noch erweitert werden. Die Angaben über die Mindestschlagweiten sollen keineswegs den Eindruck erwecken, als ob die zum Teil sehr geringen Schlagweiten (bei Reihe 10 z. B. wenige Zentimeter) in Zukunft für die praktische Verwendung vorgeschlagen werden. Da für die Bemessung der Anlagen außer elektrischen Gesichtspunkten noch andere (mechanische Kräfte bei Kurzschlüssen, Fremdkörper) von Bedeutung sind, werden die für den Wechselspannungsdurchschlag erforderlichen Mindestschlagweiten erheblich größer gewählt werden müssen.

Zum Schluß sei ein Vorschlag für den künftigen Bau von raumsparenden Anlagen gemacht. Man könnte daran denken, die Anlagen mit möglichst kleinen Abständen nach den gegebenen Richtlinien zu projektieren, zu montieren und nach dem Zusammenbau wie die Geräte zu prüfen. Diese Prüfung der Anlagen müßte allerdings nicht wie die der Geräte im Laboratorium, sondern an der Verwendungsstelle selbst erfolgen. Dazu könnten entweder transportable Prüfanlagen (Gleichspannung, Wechselspannung, Stoßspannung) benutzt werden oder unter Umständen auch die Betriebsspannung selbst mit Vorkehrungen, um Leistungslichtbogen zu vermeiden. Im letzteren Falle käme es darauf an, mit modernen Meßmitteln der Hochfrequenztechnik die Schwachstellen der Anlagen mit Sprühentladungen bei Betriebsspannung aufzusuchen und durch nachträgliche zusätzliche Isolation zu verbessern (Lackanstriche, Isolationsüberzüge usw.).

Diskussion

Schultheiß, VEB Energieprojektierung Dresden, begrüßt, daß auch Untersuchungen an Flachschienen, die jetzt fast ausschließlich verwendet werden, durchgeführt wurden. Des weiteren stellt er die Frage, mit welchen spezifischen Durchschlagspannungen in Freiluftanlagen zu rechnen ist.

Obenaus:

Die Untersuchungen erstreckten sich deshalb besonders auf Rundschienen, d. h. solche Elektroden, die der Berechnung einfach zugänglich sind, weil damit ein besserer Überblick gefunden werden kann. Ich stelle mir vor, daß für Flachschienen und anders geformte Sammelschienen in Zukunft äquivalente Rundschienendurchmesser angegeben werden, deren Abstände aus vorhandenen Kurventafeln entnommen werden können. Die Versuche erstreckten sich nur auf Innenraumanlagen. In Freiluftanlagen wird wegen der Klimaeinflüsse immer mit der Anordnung Spitze Spitze gerechnet werden müssen.

Apelt, Energiefachschule Zittau, führt aus:

Ich darf an den zuletzt gemachten Vorschlag von Herrn Prof. *Obenaus* anknüpfen. Da die Errichtung einer derartigen neuen Anlage in der Industrie bekanntlich auf gewisse Schwierigkeiten stoßen dürfte, schlage ich dazu vor, daß ein Teil des für 1956 zum Bau vorgesehenen 30/6-kV-Versuchsumspannwerkes der Fachschule für Energie Zittau mit entsprechend verringerten Abständen ausgeführt wird. Es handelt sich um eine offene Anlage mit Doppelsammelschienen auf der 30-kV- und 6-kV-Seite. Die 6-kV-Sammelschiene besitzt Vollkupplung und damit Längstrennung.

Obenaus:

Es ist sehr zu begrüßen, daß in kurzer Zeit in der Anlage in Zittau Durchschlagversuche möglich sind. Es käme darauf an, die Anlage so einzurichten, daß die Abstände verändert und auch Stutzer verschiedener Höhe eingebaut werden können.

Schmidt, Techn. Keramik Hermsdorf, vermißt, daß Untersuchungen an Isolatoren nicht mit einbezogen sind.

Zur Frage des unteren Isolationspegels nach VDE 0111/53 teilt er mit, er hätte gehört, daß die in VDE 0111/53 aufgeführten Werte des unteren Isolationspegels auch in Zukunft für Innenraumanlagen gelten sollen.

Obenaus:

Wie das Thema des Referates zeigt, sollte ausschließlich über die Durchschlagwechselspannung von Luftstrecken gesprochen werden. Die Überschlagspannung von Isolatoren wurde nicht behandelt, weil bei diesen Bauelementen die von den VDE-Vorschriften geforderte Stehspannung durch Prüfung nachgewiesen wird.

Es ist auch mir bekannt, daß Bestrebungen im Gange sind, den bisher in den VDE-Vorschriften angegebenen sehr niedrig liegenden Schutzpegel als unteren Isolationspegel nicht generell einzuführen, sondern einen etwas höher liegenden. Die Untersuchungen, insbesondere die Gegenüberstellung mit den Messungen von *Crämer*, scheinen nun gerade zu zeigen, daß eine Beibehaltung des bisher gültigen, sehr hoch liegenden unteren Isolationspegels nicht möglich sein wird, wenn eine Verkürzung der Schlagweiten angestrebt wird.

v. Schießl (Transformatorenwerk Dresden) wünscht, daß der Einfluß benachbarter Gegenstände auf die Durchschlagspannung von Luft- oder anderen Isolierstrecken, besonders bei Geräten (Wandler, Wände usw.), näher untersucht wird.

Obenaus:

Selbstverständlich werden auch benachbarte Gegenstände, wie Wandler usw., die Durchschlagspannung der Luftstrecken in gewissem Maße beeinflussen. Bei dem Referat kam es mir jedoch darauf an, Richtlinien für die große Linie bei der Projektierung zu geben. Gerade die letzten Feinheiten, wie sie Herr *v. Schießl* vorbringt, sprechen dafür, daß in Zukunft eine Schlußprüfung für die fertigmontierte Anlage eingeführt wird.

6.5 Auswertung von Schäden an elektrischen Anlagen durch Gewitterstörungen

Ing. *R. F. Becker*, Borna

Teil 1 — Beschädigung eines 3-kV-Generators

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Am 5. September 1954, 17 Uhr, erfolgte in eine an der Staatsstraße, 375 m nördlich von dem Orte Pi, stehende Linde ein überaus starker Blitzeinschlag, der auf den in unmittelbarer Nähe vorbeiführenden 3-kV-Freileitungen, und insbesondere auf den 3-kV-Leitungen WKW Pi 1 — Maststation Tü und WKW Pi 2 — Abzweig Station Ma durch kapazitive Übertragung Wanderwellen hervorgerufen hat. Hierdurch wurde die Ständerwicklung des im WKW Pi 2 in Betrieb befindlichen Drehstrom-Synchron-Generators zerstört (Bild 1a).

Bild 1a. Beschädigte Generatorwicklung

Dieser Vorfall bot den Anlaß zu einer eingehenden Untersuchung. Es erschien zweckmäßig, außer der Klärung der reinen betriebstechnischen Verhältnisse, wie die Arbeitsweise der Relais, der Schalterauslösungen usw., vornehmlich den durch die Aufladung der Leitung entstandenen Spannungsaufbau, in Verbindung mit den eingebauten Überspannungsableitern und den Erdungen, nachzurechnen.

Auf Grund der Ergebnisse und Schlußfolgerungen sollen dann die Maßnahmen festgelegt werden, die notwendig sind, um Zerstörungen durch künftige Blitzeinschläge zu verhindern.

2. Störungsvorfall

2.1 Wetterlage

In dem Raum des Blitzeinschlaggebietes war am Tage des Störungsvorfalls folgende Wetterlage zu verzeichnen:

In der Nacht bis früh 7 Uhr herrschte schwacher Südwind $V = 1{,}4$ m/s, der gegen Morgen abflaute. Es herrschte Dunst und Bodennebel bei wolkenlosem Himmel. Der Luftdruck lag zwischen 1018 und 1016 mb; die Temperatur zwischen 14 und 13° C, wobei 13° C die tiefste Temperatur während der Nacht war.

Nach der um 4 Uhr durchgeführten Messung herrschte eine Bodeninversion mit 22° C und 70% relativer Feuchte.

In 1,5 bis 1,95 km Höhe lag die erste Inversionsschicht mit 12° C und 80% relativer Feuchte und in 2,6 bis 3,0 km Höhe die zweite Inversionsschicht mit 4° C und 60% relativer Feuchte.

Tagsüber herrschte schwacher südlicher Wind, der sich von 1,4 m/s auf 2,8 m/s steigerte und nach Ost-Süd-Ost bei heiterem und später wolkigem Wetter drehte. Der Luftdruck war 1014 bis 1016 mb und die höchste Temperatur 27° C.

Nach dem Temperaturanstieg auf 27° C, Auflösung der Bodeninversion und des Bodennebels und weiterhin der aus Nordwest einziehenden Kaltfront — (Rückseitenwetter, Kaltluft unter Warmluft und zunehmender Wolkenbildung) — traten im Laufe des Spätnachmittags gewittrige Störungen ein.

Zur Zeit des Blitzeinschlages herrschte kein Regen, der jedoch unmittelbar darauf einsetzte.

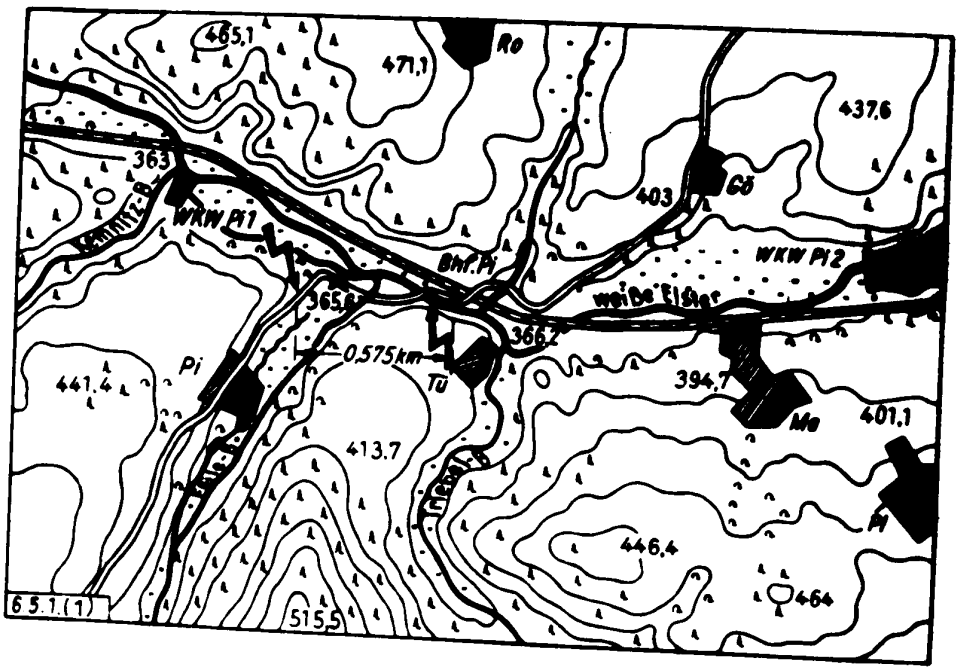


Bild 1b. Blitzeinschlaggebiet

2.2 *Geländebeschreibung und Blitzeinschläge*

Das von der atmosphärischen Entladung überzogene Gebiet zeigt Bild 1b. Die mittlere Höhe des Gebietes liegt bei 414 m über N.N. Die größeren Bodenerhebungen liegen bei 407 m und die höchste bei 515 m, die alle bewaldet sind.

Hinsichtlich der Bildung von Gewitternestern längs und an den Mündungsgebieten von Flußläufen weist das Gebiet mit der an diesem Tage herrschenden Wetterlage alle markanten Merkmale auf.

Südwind mit nur 1,4 m/s; von Osten nach Westen, mit einer Ablenkung nach Norden, wird das Gebiet von der Weißen Elster durchflossen. Vornehmlich von Süden nach Norden verlaufen

der Chemnitzbach, der Feile- und der Triebelbach, die alle in der Nähe der E-Haltestelle Pi in die Weiße Elster münden.

Während alle höher gelegenen Gebiete bewaldet sind, ist das Gebiet unmittelbar um den Blitzeinschlag frei von jeder Bewaldung.

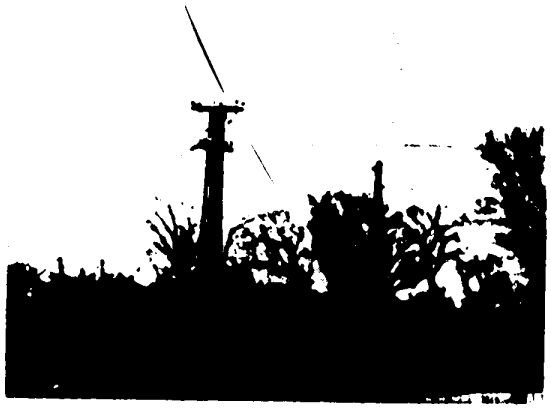


Bild 2a. Maststation „Tü"

Von Angehörigen des Netzbetriebes wurden an der Kopfkonstruktion der Maststation Tü (Bild 2a) Lichtbogenüberschläge beobachtet, die mehrere Male zündeten, in deren Verlauf dann schließlich in Richtung des WKW Pi zwei Leiter abbrannten und zur Erde fielen. Nach dieser Beobachtung handelte es sich hierbei um rückwärtige Überschläge.

Da an der Mastkopfkonstruktion keinerlei Blitzmarken zu finden waren, die Beobachtung jedoch auf rückwärtige Überschläge hindeutete — Erdübergangswiderstand 25 Ω — wurde nach dem eigentlichen Blitzeinschlagsort geforscht.

Dieser wurde dann auch in unmittelbarer Nähe der nach dem WKW Pi 2 führenden 3-kV-Leitung gefunden. Der Blitzkanal hatte in der letzten Rückstufe seinen Weg über eine Linde zur Erde genommen.

Die Linde zeigt außerordentlich starke Einschlagspuren. In den oberen Teilen des verzweigten Stammes zeigen sich mehrere Blitzbahnen, die sich dann über Unterbrechungen am eigentlichen Stamm zu einer sehr starken Blitzbahn vereinigen (Bild 2b).

Ein [illegible] Ansprühen, etwa 2 m über der Erdoberfläche, wie dies bei Einschlägen an Holzmasten von Freileitungen des öfteren festgestellt wurde, ist nicht zu verzeichnen. Die Blitzbahn führt an dem Stamm bis zur Erdoberfläche.

Um den Blitzbahnverlauf zu klären, wurde die Straße und das Gelände unmittelbar um die Linde mit der Wünschelrute nach dem Vorhandensein von Wasseradern abgesucht. Es zeigte sich, daß in etwa 2,5 m Entfernung von der Linde eine sehr starke Wasserader die Straße kreuzt.

Der Blitz hat hier offenbar seinen weiteren Weg über die Wurzeln zu der Wasserader genommen.

Im übrigen zeigt der Stamm außerdem noch Merkmale eines früheren Einschlages, der mit der Zeit vernarbt und teilweise überwachsen ist.

Bild 2b. Blitzbahnen an der Linde

2.3 Netzbild, Leitungsbeschreibungen und Erdungen

Die Schaltung des 3-kV-Netzes zeigt Bild 3. In dem WKW Pi 1 speisen mehrere Leitungen ein. Drei von dort abgehende Leitungen enden in den Kopfstationen WKW Pi 2, Station Ma und in der Station Pi Ort. Die Maststation Tü, an der die Überschläge stattfanden, ist eine Durchgangsstation. Die Gesamtstrecke besteht vornehmlich aus Holzmasten; nur die Kabelüberführungsmasten sind als Stahlgittermasten ausgebildet. Die Leiterseile 3 · 16 mm² Cu sind im Dreieck angeordnet, Erdseil ist nicht vorhanden.

Die Armierung besteht bei den Holzmasten aus sogenannten Schwanenhälsen mit Isolatoren der Post-Type; bei den Stahlgittermasten sind gerade Stützen und Isolatoren der Type J 1383 verwendet worden.

Die Kabelleitungen sind für 10 kV Betriebsspannung und besitzen 50 bzw. 70 mm² Al-Leiter. Vor der 485 m langen Kabeleinführung am WKW Pi 2 sind 3-kV-SAW-Leiter eingebaut. Der Übergangswiderstand der Erdung beträgt 20 Ω.

An Einführungskabeln größerer Länge (über 100 m) empfiehlt sich als Schutz der Einbau von Überspannungsableitern auch am Kabelende in der Station, weil es hier, wie noch gezeigt wird, infolge Wanderwellenreflexion zu gefährlich hohen Überspannungen kommen kann.

Außerdem muß der am Kabelanfang eingebaute Ableiter gut geerdet sein. Die Erde des Kabelmantels allein hat, wie alle Strahl-Erder bei dem Durchgang hoher Blitzströme, einen höheren Anfangswert, als der Messung mit der Brücke entspricht.

Infolgedessen kann bei einem Nahblitzeinschlag das Potential des Kabelmastes samt den Leitungen für die Station hinter dem Kabel auf gefährliche Werte ansteigen, wenn der Erdwiderstand des Mastes, der sich aus dem Anfangswert der Kabelerde und der Masterde selbst ergibt, nicht ausreichend klein ist.

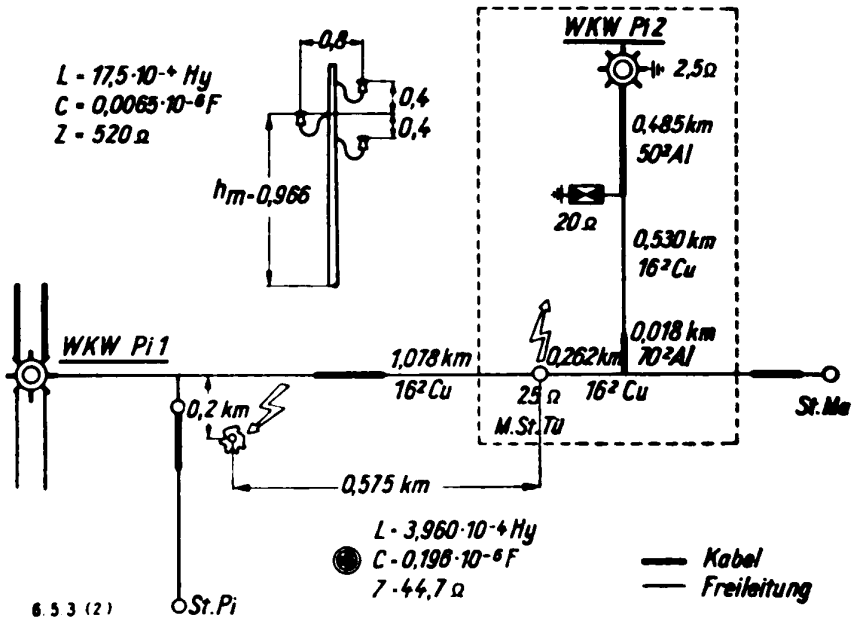


Bild 3. Schaltung des 3-kV-Netzes

Eine genügende Sicherheit ist vorhanden, wenn die Beziehungen:

bei Kopfstationen $U_a + iR\,(0{,}603) < \dot{U}_s$; und
bei Durchgangsstationen $U_a + iR\,(0{,}331) < \dot{U}_s$

erfüllt werden.

Hierin bedeuten:

$\dot{U}_s$ Stoßüberschlagspannung der Stations- bzw. Freileitungsisolation;
U_a Ansprechspannung des Ableiters;
i Blitzstrom [kA].

Der Erdübergangswiderstand der Erdung am Kabelanfang wurde mit 20 Ω gemessen, so daß dieser ein Vielfaches des Ableiter-Kennwiderstandes beträgt, und dementsprechend der genannten Beziehung nicht genügt. Die Nachrechnung ergibt, daß er bei einem Blitzstrom von 60 kA um das 4,65fache zu hoch ist. Er dürfte daher nur $\frac{20}{4{,}65}$, also 4,3 (Ω) sein.

Der Erdungswiderstand [illegible] Kopfstation WKW Pi 2 wurde mit 2,5 Ω gemessen.

Hier ist die Bedingung

$$U_s = iR = 0{,}603 \text{ mit } 96\ \text{kV}_s, \text{ also} = 150\ \text{kV}_s, \text{ erfüllt.}$$

Betrachten wir nun den Erdübergangswiderstand der Erdung der Maststation Tu, der mit 25 Ω gemessen wurde, und wenden hier die VDE-Formel an, wonach bei einem Blitzstrom von 60 kA

$$R = \frac{U_s}{i}$$

sein soll, so ergeben sich 2,5 Ω. Er ist also um das Zehnfache zu hoch.

Nun ist bei dieser Erdung außerdem zu berücksichtigen, daß hier ein einfacher langgestreckter Oberflächen-Erder mit einer Erdplatte verlegt worden ist, dessen wirksamer Widerstand bei Stoßvorgängen in den ersten μs mit dem rd. zehnfachen Ohmwert anzusetzen ist.

Aus alledem geht hervor, daß es an der Maststation Tü zu einem rückwärtigen Überschlag kommen mußte, da an den im Zuge der Leitung stehenden Holzmasten infolge der hohen Stoßfestigkeit des Holzes kein Überschlag eintreten konnte.

3. Spannungsaufbau „WKW Pi 2"

Es ist nun interessant zu ermitteln, welche Spannungserhöhungen unter diesen Verhältnissen in dem WKW Pi 2 aufgetreten sind. Dazu soll das gestrichelt umrahmte Teilnetz, also von der Maststation Tü bis zu Station Ma mit dem Abzweig zum WKW Pi 2 für sich betrachtet werden.

An Hand des Teilnetzbildes ist festzustellen, daß an der Station Ma und an der Abzweigstelle zum WKW Pi 2 kurze Kabelstücke eingebaut sind. Diese Leitungszüge sind nicht als homogene Leitungen anzusehen.

Man könnte diese in die Rechnung einbeziehen. Praktisch führt aber eine solche Rechnung zu einem fast unmöglichen Zeitaufwand und ist im allgemeinen vollständig überflüssig.

Folgende Leitsätze haben hier allgemeine Gültigkeit:

„Leitungsstücke, die im Vergleich zur Länge des Blitz-Wellenkopfes kurz sind, brauchen nicht berücksichtigt zu werden."

Der Kopf einer Wanderwelle hat beim Entstehen eine Länge von etwa 30 m (je $^1/_{10}$ μs 30 m).

Es ist daher nicht nötig, das am Abzweig eingebaute 18-m-Kabelstück (E-Kreuzung) in die Rechnung mit einzubeziehen.

Als weiterer Leitsatz gilt:

„Konzentrische Kapazitäten und Induktivitäten, die einen senkrechten Wellenstrom nur so weit verflachen würden, daß er steil ist im Verhältnis zur betrachteten einfallenden Wellenstirn, brauchen nicht berücksichtigt zu werden."

Vom Überschlagspunkt, also von der Station Tu aus betrachtet, sind die Leitungen nach WKW Pi 1 mit dem eingebauten Kabelstück einerseits und die Leitung nach der Station Ma und dem dort eingebauten Kabel andererseits als kon-

zentrische Kapazitäten und Induktivitäten anzusehen und brauchen ebenfalls nicht in die Rechnung einbezogen zu werden.

Unter diesen Gesichtspunkten ergibt sich nun das für den Spannungsaufbau maßgebende Leitungsbild (Bild 4).

Also die Reihenschaltung:

Freileitung von Maststation Tü,
Abzweig nach Station Ma,
Kabeleinführung WKW Pi 2,
Generator.

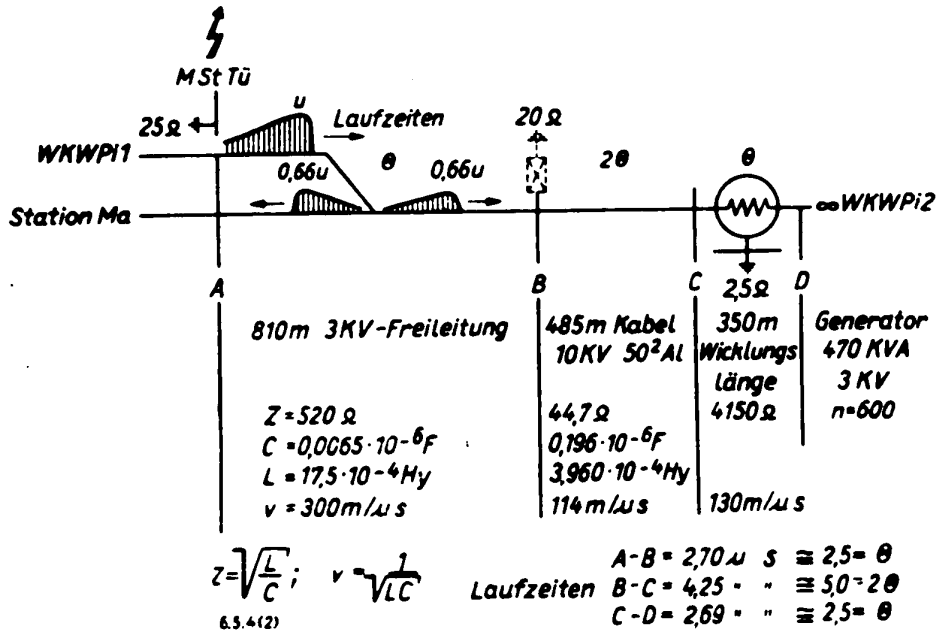


Bild 4. Leitungsbild für den Spannungsaufbau

Hierin sind die Längen der Freileitung, des Kabels und die Wicklungslänge im Generator eingetragen, ferner die Kapazitäten und Induktivitäten sowie die Wellenwiderstände und Fortpflanzungsgeschwindigkeiten und schließlich die Laufzeiten in den einzelnen Leitungsabschnitten vermerkt.

An sich könnte nun die Berechnung des Spannungsaufbaues mit Wanderwellenlehre durchgeführt werden. – Welcher Zeitaufwand hierzu notwendig wäre, ist allgemein bekannt.

Hier soll nun einmal ein anderer Weg beschritten werden, und zwar mit Hilfe des grafischen Stoßkennlinienverfahrens nach *Bergeron* (Bild 5).

Dieses Verfahren ersetzt zum Teil schwierige Rechenoperationen mit genügender Genauigkeit. Von *Bergeron*, der dieses Verfahren für Druckstöße von Flüssigkeiten, ihre Wanderung und Reflexion in Rohrleitungen entwickelt hat, wurde in der Folge darauf hingewiesen, daß dieses Verfahren auch für elektrische Wanderwellenvorgänge anwendbar ist.

Das Verfahren [illegible] Deutschen Republik kaum bekannt geworden und *Koettnitz* hat [illegible] das Verfahren für die Anwendung auf elektrische Wanderwellen ausgearbeitet [1].

Damit hat *Koettnitz* den Betriebsingenieuren ein Mittel in die Hand gegeben, mit dem in einfacher Form und ohne großen Zeitaufwand Spannungsaufbauten durch Überspannungswellen sowie Spannungsabbauten durch Schutzkondensatoren oder Überspannungsableiter usw. dargestellt werden können.

In Bild 5 ist nun der Spannungsaufbau für das Leitungsbild

„Freileitung Pi 1—Pi 2 (Kabelanfang–Kabelende–Generator)"

wiedergegeben.

Der geringe zur Verfügung stehende Platz gestattet es leider nicht, auf die Theorie des Bergeron-Verfahrens selbst einzugehen [1].

Zum Gebrauch des Verfahrens sei gesagt, daß das Leitungsbild die Grundlage bildet. Hierin sind die Leitungslängen mit x, die Wellenwiderstände mit Z, die Wellenlaufzeiten mit v und die Knotenpunkte mit A, B, C und D der verschiedenen Leitungsabschnitte oder Leitungselemente eingetragen, die die Unstetigkeitspunkte der Leitung bedeuten.

Aus den Leitungslängen ergeben sich mit den errechenbaren Wellen

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ die Wellenlaufzeiten } v = \frac{1}{LC}$$

zwischen den einzelnen Unstetigkeitspunkten. Dabei werden die Wellenlaufzeiten entweder als μs oder als ein Vielfaches der Grundeinheit für jeden Leitungsabschnitt angesetzt.

Hier in diesem speziellen Fall für das Leitungselement

Freileitung	von A nach B	$\cong 2{,}5\ \mu s =$	Θ
Kabel	von B nach C	$\cong 0{,}5\ \mu s =$	$2\ \Theta$
Generator	von C nach D	$\cong 2{,}5\ \mu s =$	Θ

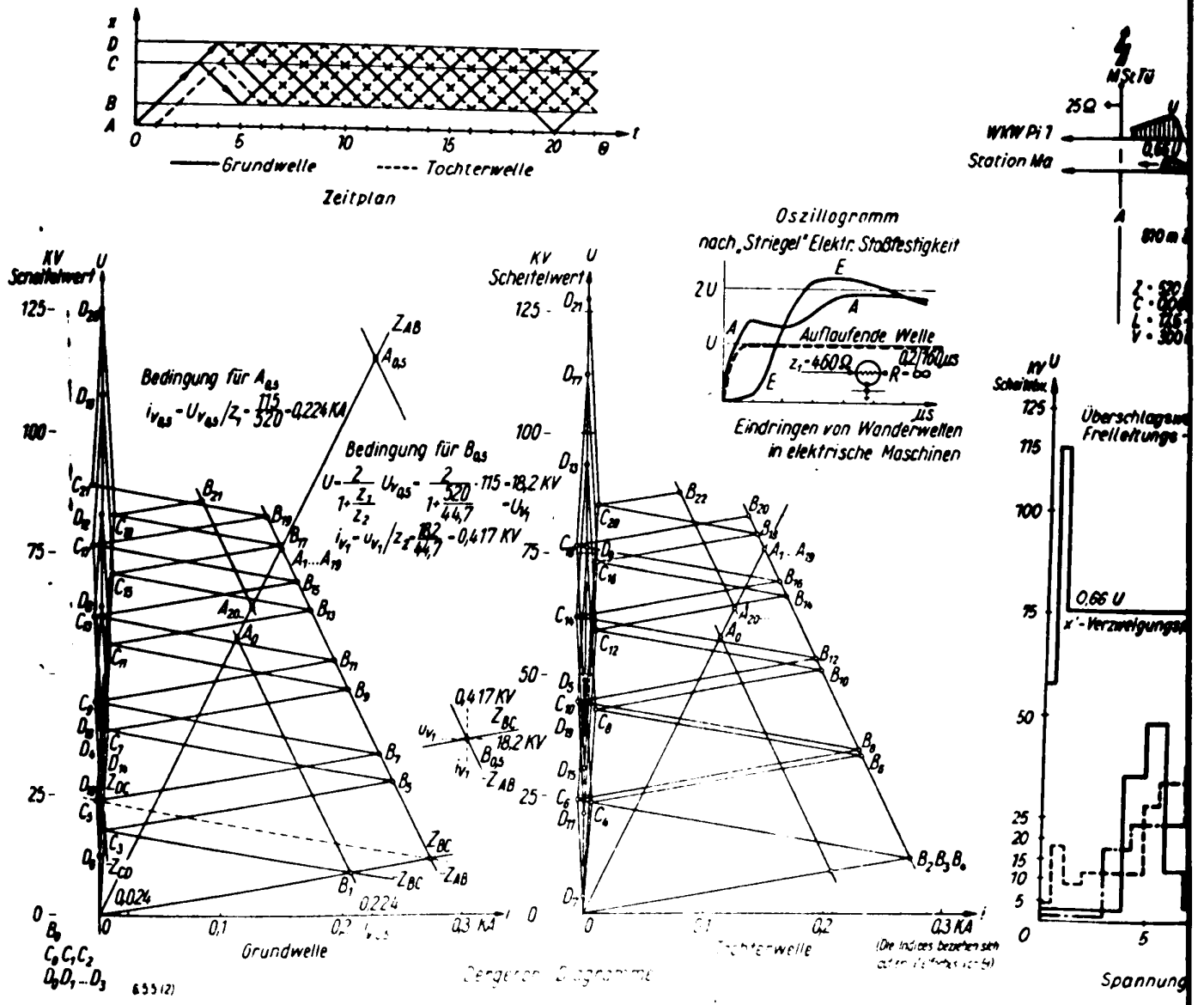
Danach wird der Zeitplan aufgestellt. Er zeigt den Zusammenhang zwischen den Leitungslängen x und der Zeit t, ausgedrückt in μs oder in Zeiteinheiten durch Θ.

Er entspricht dem Fahrplan der vor- und rückwärtslaufenden Wellen von den verschiedenen Leitungspunkten aus. Dies ist durch die Pfeilrichtung zu erkennen, und es zeigt auch deutlich die Abmarschzeit der verschiedenen Wellen an und gestattet, die Schnittpunkte eindeutig zu bestimmen.

Dies ist die Grundlage des Bergeron-Verfahrens.

Das Bergeron-Diagramm ist schließlich die Übertragung der Wanderwellenvorgänge aus der x, t-Ebene in die U, i-Ebene unter Berücksichtigung der für die verschiedenen Leitungselemente bzw. ihre Zusammensetzung geltenden Berechnungsgesetze.

Die vorwärtslaufenden Wellen werden durch Gerade mit der Neigung $(-Z)$ dargestellt, ihre Neigungen nach u- und i-Werten errechnet. Die berechneten Werte sind im Diagramm vermerkt. Die Schnittpunkte zweier Geraden ergeben dann die jeweils gesuchten Punkte, d. h. die Spannungshöhen an den Unstetigkeitspunkten des Leitungsgebildes.



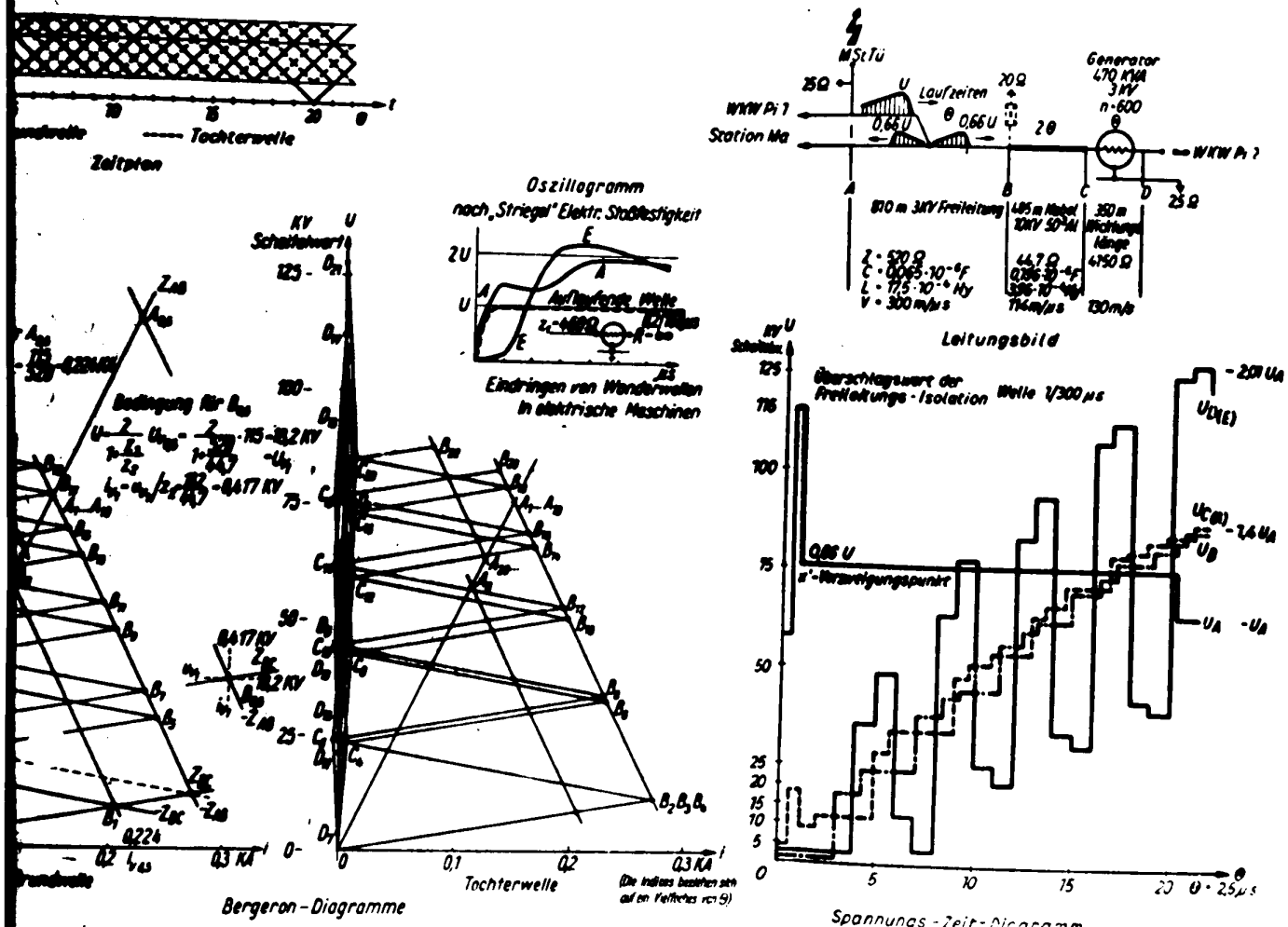


Bild 5. Spannungsaufbau

Zur besseren Übersicht zeichnet man die Bergeron-Diagramme, wo sich dies erforderlich machen sollte, für die Grundwelle und für die Tochterwelle getrennt.

Schließlich folgt nun das Spannungs-Zeit-Diagramm für die verschiedenen Leitungspunkte, die aus dem Bergeron-Diagramm entnommen werden.

Jedem Schnittpunkt in der U, i-Ebene ist als Schnittpunkt der Bergeron-Geraden eine bestimmte Schnittpunktzeit dem Zeitplan zugeordnet. Die Übertragung in die u-, t-Ebene ist daher ohne weiteres möglich.

Das u, t-Diagramm ergibt die gesuchten Linienzüge, die die Spannungsbeanspruchung verschiedener Leitungspunkte und selbst des Generators beim Einfallen von Wanderwellen aufzeigen.

Was sagt nun dieses Spannungs-Zeit-Diagramm aus?

Hierzu sei noch folgendes vorausgeschickt:

Durch Überschlag der Freileitungsisolation abgeschnittene Wellen haben im allgemeinen nur eine sehr kurze Halbwertdauer von 5 μs, während man bei Einschlag oder Influenz (kapazitive Übertragung) ausgelöste Wellen mit einer Halbwertdauer von 300 μs zu rechnen hat.

Nach dem eingangs Gesagten handelt es sich in diesem Fall um eine durch Influenz ausgelöste Überspannungswelle, die mit 1/300 μs durch eine Rechteckstufenwelle angeglichen ist.

Der Überspannungsableiter wurde in dem Leitungsplan und in das Bergeron-Diagramm nicht mit einbezogen, da infolge des hohen Übergangswiderstandes der Erdung der Ableiter gar nicht wirksam werden konnte. Nach dem Vorausgesagten wäre eine Absenkung erst über eine Spannung von

$$2\,[\mathrm{kA}] \cdot (20 \cdot 10)\,[\Omega] = 400\,[\mathrm{kV}]$$

möglich gewesen, die nicht aufgetreten ist.

Die Ableiter zeigten keinerlei Merkmale vorangegangener Ansprechvorgänge. Insbesondere ergab die Prüfung, daß keine Absenkung des Ansprechverhältnisses zu verzeichnen war.

Die Ableiter waren lt. Betriebsanweisung im April 1950 geprüft worden. Das Ansprechverhältnis wurde festgestellt.

Ableiter oben $\frac{U_A}{U_B} = 2{,}07$

Ableiter Mitte $\frac{U_A}{U_B} = 1{,}84$

Ableiter unten $\frac{U_A}{U_B} = 2{,}07.$

Die Prüfung nach dem Schadensfall am 17. September 1954 ergab:

Ableiter oben $\frac{U_A}{U_B} = 2{,}1$

Ableiter Mitte $\frac{U_A}{U_B}$ 2,2

Ableiter unten $\frac{U_A}{U_B}$ 2,07.

Hiernach ergibt sich, daß sich die Meßwerte innerhalb der Meßdifferenzen bewegen. Die Ableiter waren demnach, abgesehen von der schlechten Erdung, voll einsatzfähig.

Schließlich ist noch zu vermerken, daß für die Behandlung der Wanderwellenvorgänge das Leitungsbild verlustlos angenommen wurde, was für die geringe Spannung durchaus angängig ist.

Aus dem Spannungs-Zeit-Diagramm, das den Spannungsaufbau für den Kabelanfang, und das Kabelende, das zugleich den Anfang der Generatorwicklung darstellt, nach der Verzweigung und nach anfänglich niedrigen Spannungswerten, bedingt durch die Wellenbrechung und Reflexionen an den Knotenpunkten des Spannungsaufbaues, bis zum 1,4fachen Betrag der aufgelaufenen Welle eingetreten ist.

Am Generatorsternpunkt springt die Spannung außerordentlich stark an und übersteigt nach rd. 50 μs die aufgelaufene Welle um das 2,01fache mit einem Scheitelwert von 127,5 kV.

Dies mußte zum Durchbruch und zur Zerstörung der Isolation der Generator-Ständerwicklung führen, wodurch ein nicht unerheblicher Schaden und Ausfall der Stromlieferung entstanden ist.

Die Eingangswindungen und die Windungsteile am Sternpunkt des Generators sind als Reflexionspunkte besonders gefährdet. Dabei spielt der Wellenwiderstand der Wicklung eine entscheidende Rolle.

Ist dieser höher als der Wellenwiderstand von 520 Ω der vorgeschalteten Freileitung (oder wie hier des Kabels von 44,7 Ω), was hier mit 4150 Ω für den Generator zutrifft, so treten durch die Wellenreflexion an den Stoßstellen höhere Spannungen auf, die die Eingangswindungen und die Windungen am Sternpunkt außerordentlich gefährden.

Dies geht aus dem Spannungs-Zeit-Diagramm für die Spannung U_G am Eingang der Wicklung und U_D am Sternpunkt eindeutig hervor. Diese Gefährdung besteht insbesondere für Generatoren kleiner Leistung (unter 1,5 MW) und hoher Spannung (3 kV und darüber).

Das Spannungs-Zeit-Diagramm in Verbindung mit dem Bergeron-Verfahren zeigt aber auch noch etwas anderes sehr Wissenswertes.

In der Mitte des Bildes 5 ist eine oszillographische Aufnahme wiedergegeben, die die Spannung als Funktion der Zeit bei Auflaufen oder Eindringen einer Wanderwelle in elektrische Maschinen darstellt

Ich möchte das Oszillogramm im Vergleich zu den Ergebnissen der Durchführung des Bergeron-Verfahrens stellen, indem, wie es hier durchgeführt worden ist, auch die Wicklung im Generator als Leitungselement mit einbezogen ist.

Da das Oszillogramm an einer 34-kVA-Maschine von 500 V aufgenommen wurde, die auflaufende Welle 0,2/160 μs beträgt und der Maschine eine Freileitung mit dem Wellenwiderstand von 460 Ω gegenüber der Vorschaltung eines Kabels von 44,7 Ω war, können nur der Charakter, nicht aber die Spannungshöhe in Vergleich gezogen werden.

Es zeigt sich jedoch eindeutig, daß mit dem Bergeron-Verfahren die Vorgänge in Maschinenwicklungen in sehr einfacher Weise dargestellt werden können. Und darüber hinaus, daß dem Betriebsingenieur hier ein Mittel in die Hand gegeben ist, ohne langwierige und umfangreiche Rechnung sich über solche Verhältnisse Klarheit zu verschaffen.

Aus dem Spannungs-Zeit-Diagramm geht, wie schon angedeutet, hervor, daß sich die Spannung am Anfang der Generatorwicklung [$U_{C\,(A)}$] auf das 1,4fache und die Spannung am Sternpunkt des Generators [$U_{D\,(E)}$] auf das 2,01fache der aufgelaufenen Überspannungswelle aufgebaut hat.

Nach den früheren „Regeln für elektrische Maschinen" (REM) waren vorgeschrieben:

die Wicklungsprobe,
die Sprungwellenprobe und
die Windungsprobe.

In den jetzt gültigen VDE-Vorschriften 0530/9-53 ist der § 51 für die Sprungwellenprobe ausgelassen.

Die Prüfungen für den behandelten Generator geschehen jetzt nur noch

für die Wicklungsprobe mit 3 $U = 9$ kV während 1 min und
für die Windungsprobe mit 1,3 $U = 3{,}9$ kV während 3 min.

Man kann wohl zugeben, daß dies keine Prüfungen sind, die den Betriebsbedingungen durch auflaufende Überspannungswellen nahekommen.

Im Hinblick auf die dargelegten Verhältnisse erscheint es angebracht, die Frage aufzuwerfen, ob die Sprungwellenprobe in der früheren Fassung oder in ähnlicher Form wieder zur Vorschrift erhoben werden kann, oder ob man den Weg beschreiten und entsprechende Schutzvorkehrungen zu treffen.

6. Spannungsabbau durch Kondensatoren

Welche Maßnahmen können nun getroffen werden, um solche Generatorschäden vermeiden zu verhindern?

Es ist selbstverständlich in erster Linie der Überspannungsableiter zu nennen, auf den ich noch besonders eingehen werde, weiterhin der Einbau einer Drossel zwischen dem Generator-Sternpunkt und Erde, und schließlich der Einbau eines Querkondensators (Bild 6), der einmal die sehr steilen Spannungsspitzen verflacht und zum anderen die Höhe der auflaufenden Wanderwelle absenkt [2].

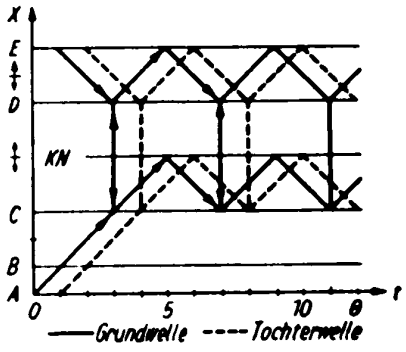
Es ist bekannt, daß zur Abflachung der steilen Spannungsspitzen in der Stufung
bis 1 kV Betriebsspannung eine Kondensatorkapazität von 1 μF/Leiter,
von 3 bis 6 kV Betriebsspannung eine Kondensatorkapazität von 0,15 μF/Leiter,
von 10 bis 30 kV Betriebsspannung eine Kondensatorkapazität von 0,075 μF/Leiter
sich als zweckmäßig erwiesen haben.

Weiterhin, daß unter der Voraussetzung, daß keine höhere Spannung in der Station als die auflaufende Wanderwellenspannung auftreten soll, eine Mindest-Kondensatorkapazität von 0,8 μF/Leiter erforderlich ist.

Und soll die auflaufende Wellenspannung auf die Hälfte ihrer Höhe abgesenkt werden, dann sind Kondensatoren von 2 μF erforderlich, die zweckmäßig in Stern zu schalten sind.

Hierzu können normale Blindstromkondensatoren Verwendung finden, und zwar für

3-kV-Betriebsspannung mit einer Leistung von 12 kVar,
6-kV-Betriebsspannung mit einer Leistung von 25 kVar,
10-kV-Betriebsspannung mit einer Leistung von 65 kVar,
15-kV-Betriebsspannung mit einer Leistung von 150 kVar,
20-kV-Betriebsspannung mit einer Leistung von 200 kVar.



Zeitplan (Prinzip)

Kondensator-Widerstand Z''

$\frac{2 \cdot C}{\theta} = \frac{1}{Z''} = y'$ $\quad C = 1{,}53 \cdot 10^{-6}\,F$ $\quad \theta\ 30{,}6$

$y' = \frac{2 \cdot 1{,}53}{30{,}6} = 0{,}1$

$Z'' = \frac{1}{0{,}1} = 10\,\Omega$

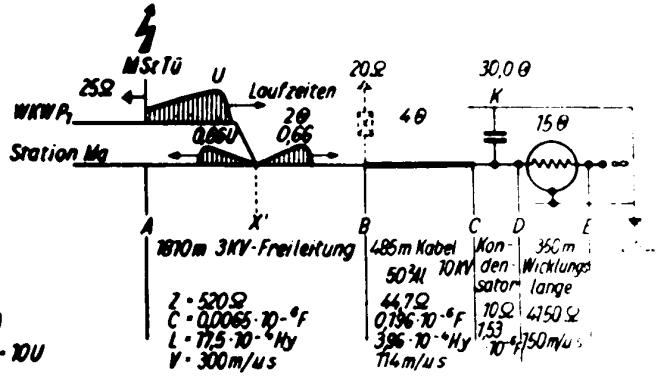
Bedingung für -Z'

$U_{V3} = \frac{2 \cdot Z''}{Z_2 + Z''} \cdot U_{V2} = \frac{2 \cdot 10}{44{,}7 + 10} \cdot 76 = 27{,}8\,KV = U_{V3}$

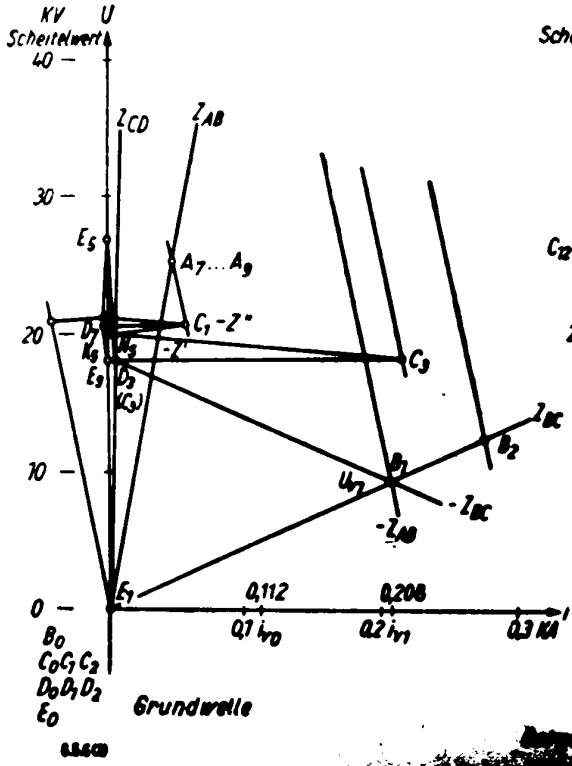
$i_{V3} = U_{V3}/Z_3 = \frac{27{,}8}{2{,}7} = 2{,}7\,KA$ bezogen auf 1KA $= \frac{27{,}8}{2{,}7} = 10U$

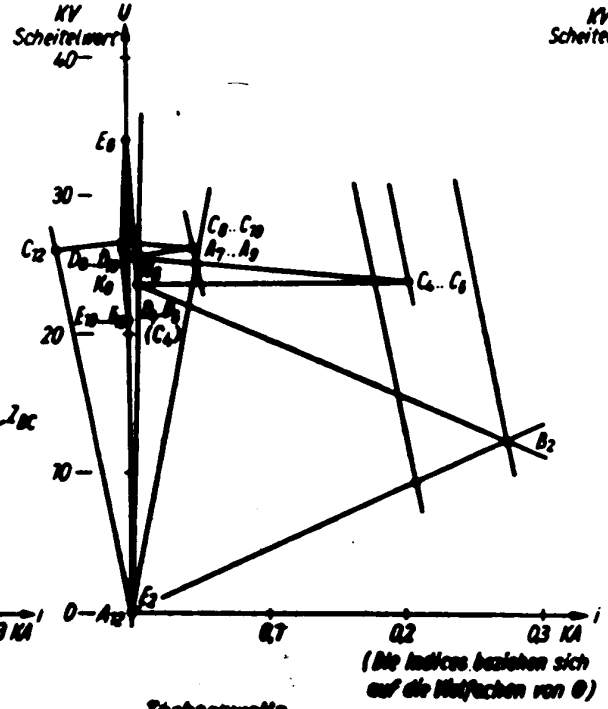
Bedingung für Z''

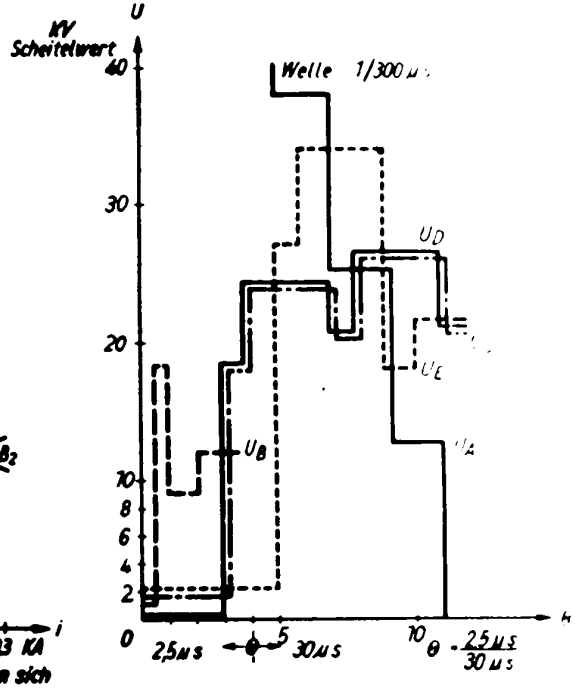
$Z'' = \frac{Z_2 \cdot Z'}{Z_2 + Z'} = \frac{44{,}7 \cdot 10}{44{,}7 + 10} = 0{,}2U$ bezogen auf 1KA



Leitungsbild







Spannungs-Zeit-Diagramm

Diese Werte gelten unter der Voraussetzung, daß die Wanderwelle über eine Freileitung einfällt [3].

Dabei ist es zur Verhinderung der Erhöhung des Erdschlußstromes gelöschter Netze zweckmäßig, den Sternpunkt der Kondensatoren unter Zwischenschaltung eines Überspannungsableiters zu erden. Der Überspannungsableiter braucht hier nur für die $1/\sqrt{3}$fache Betriebsspannung bemessen zu sein [2].

In diesem Diagramm ist nun die Spannungsabsenkung durch einen eingebauten Querkondensator von 12 kVar entsprechend 1,53 μF nach dem Bergeron-Verfahren wiedergegeben [3].

Das Leitungsbild dient auch hier wiederum als Grundlage. Die Kondensatoren mit einer Leistung von 1,53 μF wurden deshalb in die Rechnung eingesetzt, da diese greifbar waren und in der Zwischenzeit als Schutz für die Generator-Ständerwicklung bereits eingebaut worden sind.

Der Zeitplan gibt wiederum den Fahrplan an. Für die von Punkt A und B im Punkt C auflaufende Welle wirkt der Kondensator zunächst als Kurzschluß, was bei der Konstruktion des Zeitplans und des Bergeron-Diagramms zu beachten ist.

Die für die Konstruktion der Bergeron-Geraden $-E'$ und E'' sowie die Festlegung der Wellenlaufzeit im Kondensator und seines Kennwiderstandes sich ergebenden u- und i-Werte sind im Bild vermerkt.

Das Spannungs-Zeit-Diagramm sagt aus, daß die höchste auftretende Spannung am Anfang der Generatorwicklung einen Scheitelwert von 26 kV und am Ende der Generatorwicklung 34 kV erreicht.

Das ist im ersten Fall eine Absenkung um rd. 24 % und im zweiten Fall rd. 55 % der mit 76 $kV_{Scheitelwert}$ aufgelaufenen Spannungswelle.

Im Vergleich zu der absenkenden Wirkung der vorgenannten Kondensatorkapazitäten ergibt sich eine geringe höhere prozentuale Absenkung als 50%. Dies erklärt sich einfach dadurch, daß hier vor dem Kondensatoreinbaupunkt unmittelbar das Kabel geschaltet ist und sich durch seine Kapazität bzw. durch die Brechung und Reflexionen des Kabels am Kondensator schon eine niedrige Spannungshöhe einstellt.

Auch hier ist es möglich, unter Zuhilfenahme des Bergeron-Verfahrens die Verhältnisse in einfacher Form und schnell darzustellen.

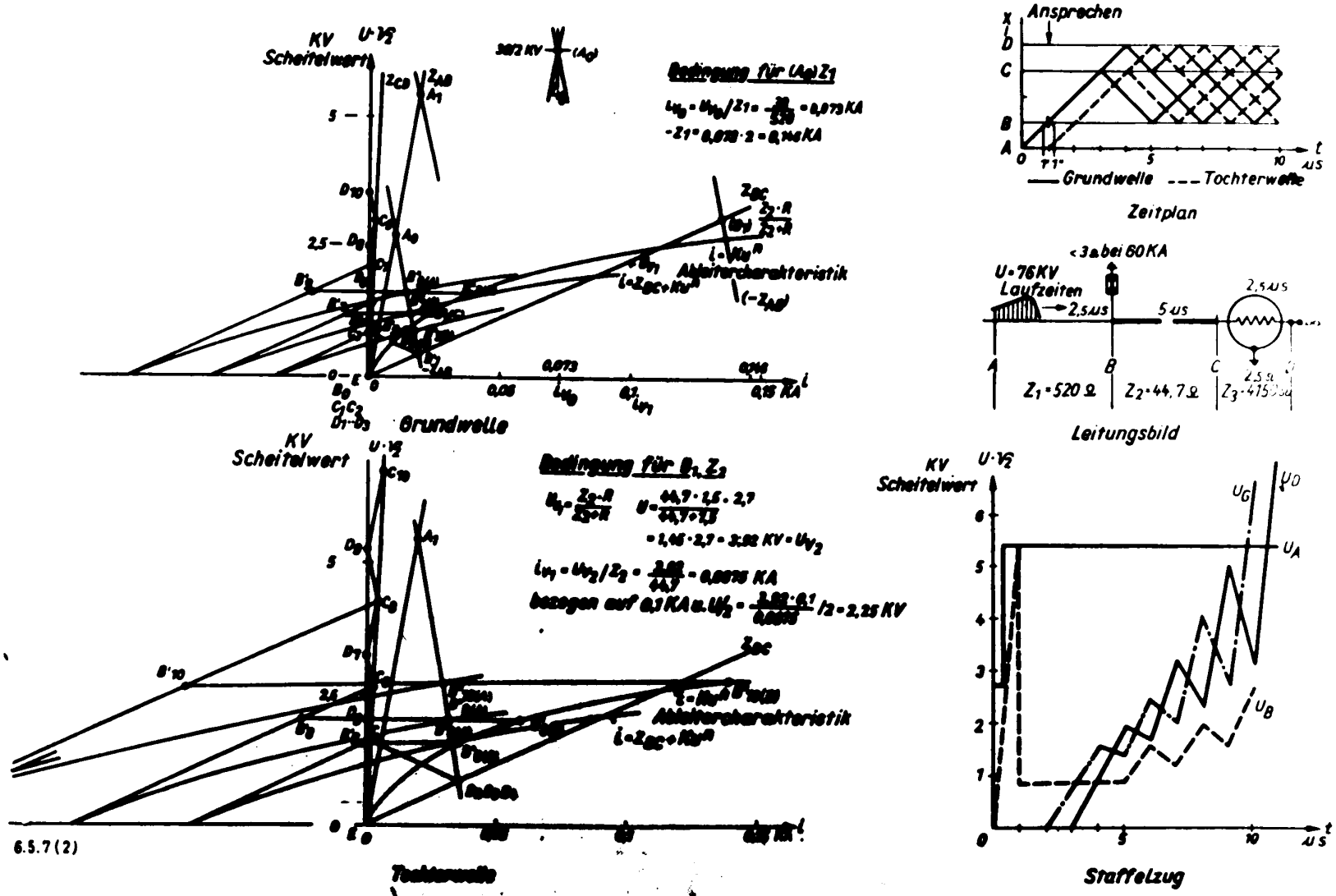
5. Spannungsabsenkung durch Überspannungsableiter

Betrachten wir nun einmal die Absenkung der einfallenden Welle durch einen Überspannungsableiter (SAW) (Bild 7).

Wir haben gesehen, daß infolge des hohen Übergangswiderstandes der Erdung die eingebauten Ableiter nicht zum Ansprechen kommen konnten, und daß die immer wieder erhobene Forderung, Ableiter mit einer guten Erdung zu versehen, unbedingt beachtet werden muß.

Hier in diesem Fall muß die Erdung verbessert und mindestens ein Übergangswiderstand von 2,5 Ω erreicht werden.

Für die Konstruktion des Bergeron-Diagramms sind wiederum das Leitungsbild und der Zeitplan maßgebend. Im Punkt B_1 spricht der Ableiter bereits an, da seine Ansprechspannung von $3 \cdot 1{,}8$ (für alte SAW-Ableiter) $= 5{,}4\sqrt{2}$ kV überschritten ist.



6.5.7 (2)

Spannungs – Zeit – Diagramm

Zur Konstruktion des Bergeron-Verfahrens muß die Ableitercharakteristik gekennzeichnet durch die Beziehung

$$i = k u^n$$

herangezogen werden.

Die Konstante k beträgt für einen SAW-Ableiter $= 1{,}5 \frac{\text{kA}}{\text{kV}}$ und der Exponent $n = 4{,}5$, woraus in einfacher Weise die Ableiterkennlinie errechnet und konstruiert werden kann.

Die Neigung der Bergeron-Geraden Z_2 ergibt sich aus der Beziehung

$$Z_2 = Z_{BO} + k u^n.$$

Die gesuchten A-Punkte liegen dann auf der Waagerechten zur Abszissenachse im Abstand U und alle B-Punkte auf der Kurve für die Ableitercharakteristik; die C-Punkte auf der Z_2-Geraden und schließlich alle D-Punkte auf der Ordinate.

Die Spannungswerte im Spannungs-Zeit-Diagramm sind diesmal als Staffelzug eingetragen.

Was können wir nun aus diesem Diagramm entnehmen?

Der Ableiter senkt im Punkt B_1 zum Zeitpunkt 1 µs die Spannung auf $0{,}8\sqrt{2}$ kV ab. Diese steigt zeitlich durch die Wellenreflexion allmählich wieder an, was sich aus dem Spannungs-Zeit-Diagramm ergibt.

Wir sehen weiterhin, daß die Spannungen U_C und U_D, das sind die Spannungen am Anfang und Ende der Generatorwicklung, bei 9 bis 10 µs die Ansprechspannung des Ableiters übersteigen.

Die Frage, ob der Ableiter zweckmäßig am Anfang oder Ende des Kabels oder am Anfang und Ende des Kabels einzubauen ist, läßt sich nach den Ergebnissen des Bergeron-Diagramms leicht entscheiden.

Hier in diesem Beispiel genügt es, den Ableiter am Ende des Kabels einzubauen. Einmal ist es an dem jetzigen Einbauort nur mit sehr hohem Aufwand möglich, eine Erdungsverbesserung durchzuführen. Zum anderen ist im WKW ein den Erfordernissen entsprechender Erdübergangswiderstand der Erdung vorhanden. Auch mit Rücksicht auf die Stoßdurchschlagspannung des Kabels läßt sich der Einbau hinter dem Kabel vertreten.

Das verlegte 50-mm²-Kabel hat eine 80%ige Mindest-Stoßdurchschlagspannung von 240 $\text{kV}_{\text{Scheitelwert}}$. Auch wenn der Einschlag hinter Verzweigungspunkt x' erfolgt, treten immerhin erst 115 $\text{kV}_{\text{Scheitelwert}}$ auf.

6. Spannungsaufbau, -abbau und -absenkung am Sternpunkt des Generators

Betrachten wir noch das Zusammenwirken der Spannungsabsenkung durch den Kondensator und durch den Überspannungsableiter (Bild 8). Dazu sind aufgetragen der Spannungsaufbau durch die aufgelaufene Welle ohne Kondensator und ohne Ableiter, die Spannungsabsenkung durch den Kondensator und des Ableiters und letzterer im zehnfachen Maßstab.

Man ersieht hieraus, daß der Kondensator eine Absenkung auf 45% und der Ableiter eine solche auf 10% herbeigeführt hat, wodurch ein genügender Schutz für die Generatorständerwicklung gegeben ist.

7. Spannungsabsenkung durch Löschrohrableiter

Schließlich sei nun noch die Absenkung der einfallenden Welle durch einen Löschrohrableiter in den Kreis der Betrachtungen mit einbezogen (Bild 9).

Das Löschrohr ist nicht am Kabelanfang, sondern in einer Schutzentfernung rund 400 m vor dem Kabel eingebaut [4].

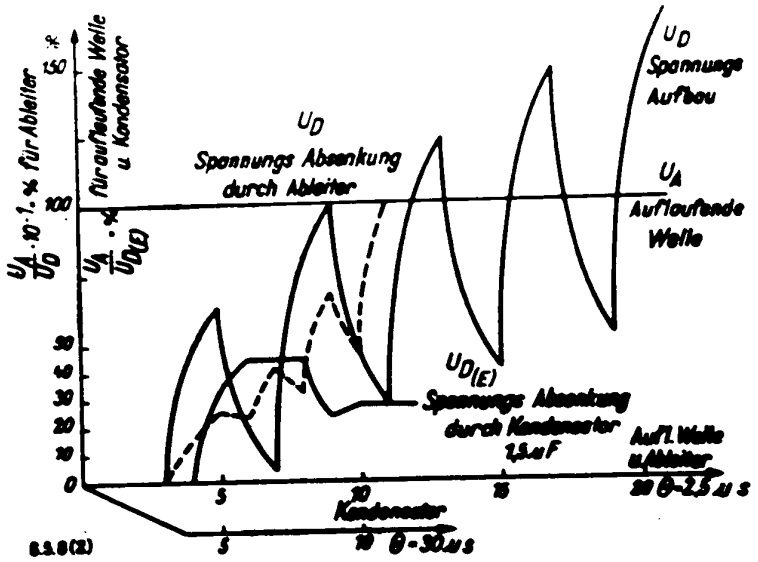


Bild 8. Spannungsaufbau, -abbau und -absenkung am Sternpunkt des Generat

Das Bergeron-Diagramm ist nach den gleichen Grundsätzen wie beim Ab Ableiter gezeichnet, nur daß hier an Stelle der Ableitercharakteristik der wirk Stoßwiderstand der Erdung des Löschrohrableiters mit der Bergeron-Gerad einbezogen wird.

Aus dem Spannungs-Zeit-Diagramm geht hervor, daß nach 0,45 µs Lau die aufgelaufene Welle bei 18 kV begrenzt und auf 2,8 kV abgesenkt wird, sich dann in ungefährlichen Grenzen auszuschwingen.

Die höchsten Spannungsamplituden an den Unstetigkeitspunkten für den Ka anfang U_B, Kabelende = Anfang Generatorwicklung U_G und Ende der Generat wicklung U_D sind in dem Spannungs-Zeit-Diagramm vermerkt; demnach erf die Ausschwingung gleichfalls in ungefährlichen Grenzen.

Zum Vergleich ist ein Oszillogramm eines Modellversuches nach *Jörki* wied gegeben. Es entspricht nicht den gleichen Verhältnissen hinsichtlich der Schut entfernung, da hier das Löschrohr in 300 m Entfernung vor dem zu schützende Anlagenteil eingebaut war.

Es zeigt einmal die laufende Welle *1*, die Absenkung durch Überschlag ohne Löschrohr *2* und schließlich die Absenkung durch das Löschrohr *3*. Man erkennt auch hier die Oszillation nach dem Abschneiden der Welle durch das Löschrohr. Auch hierfür bietet das Bergeron-Verfahren ein gutes und schnelles Hilfsmittel, um sich über die Vorgänge zu informieren.

In Anlehnung an die Darstellung über das Zusammenwirken von Schutzkondensatoren und Überspannungsableitern sei hier noch der Hinweis für den Einbau von Löschrohrableitern und Überspannungsableitern (SAW) gegeben.

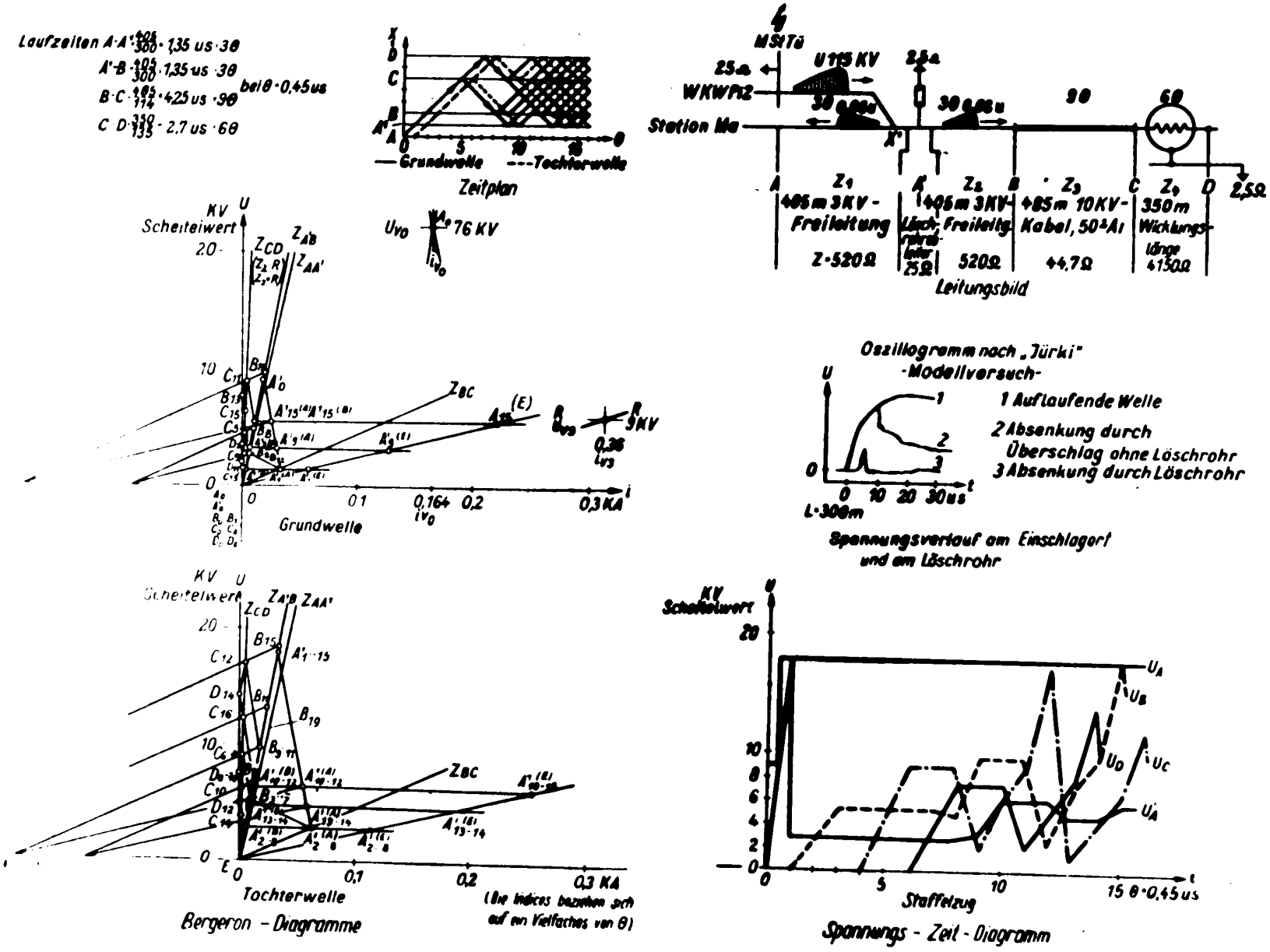


Bild 9. Spannungsabsenkung durch Löschrohrableiter in Schutzentfernung

Betrachten wir das K[illegible] Anlageteil. Dann ist ein wirkungsvoller Schutz [illegible] einer Entfernung von 300 m vor dem Kabel eingebaut wird und der Überspannungsableiter am Ende des Kabels.

Sollte ein Einschlag zwischen dem Kabel und dem Loschrohr-Einbauort erfolgen, so ist bei dem betrachteten Leitungsbild für das Kabel keine Gefahr, da, wie bereits dargelegt, für das 50 mm² dicke Kabel eine Mindest-Stoßdurchschlagspannung von 240 kV$_{\text{Scheitelwert}}$ besteht und eine durch Direkteinschlag entstehende Welle schon nach etwa 5 μs abgeklungen ist. Die das Kabel durchlaufende Welle wird dann vom SAW-Ableiter auf eine ungefährliche Spannungshöhe abgesenkt.

8. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Diese Ausführungen sollten einmal zeigen, in welcher Form ein Störungsvorfall, der mit einem erheblichen Schaden verbunden ist, ausgewertet werden soll und wie hierzu die Aufgaben gestellt werden müssen.

Das systematische Vorgehen von der Wetterlage ausgehend, die Geländedurchforschung und die Suche nach dem Blitzeinschlag und schließlich seine Auswirkungen auf unsere Übertragungsanlagen waren schon immer lohnend.

Es wurde gezeigt, wie man sich über Wanderwellenvorgänge in einem bestimmten Leitungsgebilde die nötige Übersicht verschaffen kann.

Wohl sind die Rechnungsgrundlagen für die Bestimmung der Größen, beispielsweise der Schutzkondensatoren, vorhanden, aber die Durchrechnung auf das jeweils spezielle Leitungsgebilde ist dennoch erforderlich.

Es wurde dargelegt, welche Auswirkungen durch schlechte Erdungen in bezug auf die elektrischen Anlageteile entstehen, die so weit führen, daß beispielsweise ein Überspannungsableiter überhaupt nicht in Funktion tritt und wertvolle Anlageteile zerstört werden.

Auf Grund dieses Vorfalls in Verbindung mit der durchgeführten Untersuchung sind und werden jetzt eine Reihe bestehender WKW-Anlagen nach diesen Gesichtspunkten überprüft und Vorkehrungen zum Schutz der Generatoren getroffen. Auch auf neue, im Aufbau befindliche WKW wird dies ausgedehnt. Auch bei einer ganzen Reihe von Umspannwerken sind solche Untersuchungen notwendig.

Des weiteren wurde noch eine Darstellung über das Zusammenwirken von Schutzkondensatoren und Überspannungsableitern gegeben sowie der Einbau von Löschrohrableiter in Verbindung mit Überspannungsableitern zur Erzielung einer guten Schutzwirkung erwogen.

Schließlich sei noch vermerkt, daß diese Vorgänge mit Hilfe des Stoßkennlinienverfahrens nach *Bergeron* und *Koettnitz* einfach und schnell aufgezeigt werden können.

Wenn jede Störung, die einen Schaden zur Folge hat und auf atmosphärische Einwirkungen zurückzuführen ist, in der dargelegten Form behandelt wird und auf Grund der Ergebnisse die nötigen Schutzvorkehrungen getroffen werden, dann werden einmal die Betriebskosten erheblich gesenkt und zum anderen die Betriebssicherheit unserer Übertragungsanlagen nicht nur erhalten, sondern im entscheidenden Maße erhöht, und Stillstandszeiten aus den geschilderten Verhältnissen werden nicht mehr auftreten.

9. Literatur

[1] *Kostnitz, H.:* Das Stoßkennlinien-Verfahren nach Bergeron. Institut f. Energetik, HSÜ, Techn. Bericht Nr. 3/66.

[2] *Schulze, H.:* Sicherung der Generatoren und Erregermaschinen gegen Überspannungen. Technisch-wissenschaftliche Zentrale für die Energiebetriebe. Technischer Bericht Nr. 4.

[3] *Schulze, H.:* Überspannungsschutz durch Kondensatoren und Kabel. Institut f. Energetik HSÜ, Bericht Nr. 22, Überspannungsschutz, Teil 2, Vortrag 4, S. 29 und 30.

[4] *Jödl, J.:* Einbau und Schutzentfernung von Löschrohren in Mittelspannungsnetzen. Erscheint demnächst in der „Energietechnik".

[illegible] — Beschädigung einer 15-kV-Freileitung

[illegible]

[illegible] Beschädigung der 15-kV-Mittelspannungsfreileitung trat am 6. Juli 1954 ein. [illegible] diesem Tage war folgende Wetterlage zu verzeichnen:

[illegible] war die Wetterlage wolkenlos. Es herrschte Dunst. Der Luftdruck war [illegible] mb, Temperatur 11° C, Windrichtung und Stärke SSO 1,4 m/s.

[illegible] stark bewölkt, weiterhin Dunst, Luftdruck 1013 mb, Temperatur 12° C, [illegible]richtung und Stärke SSO 1,4 m/s.

Der Temperaturanstieg bis auf 19° C und Verschwinden der Bodeninversion bei einer relativen Luftfeuchte von 87% bewirkte den Aufbau des Gewitters, so daß es bereits gegen 11 Uhr zu atmosphärischen Entladungen kam.

Infolge der lang andauernden Niederschläge der vorherigen Wochen herrschte allgemein eine hohe Luftfeuchtigkeit. Niederschlag im Monat Juni im Raum Leipzig 211,6 mm, das einer täglichen Niederschlagsmenge von 7,05 mm entspricht. Vom 1. bis 6. Juli war eine Niederschlagsmenge von 43,3 mm zu verzeichnen, was einer täglichen Niederschlagsmenge von 7,2 mm entspricht. Die atmosphärische Entladung vollzog sich bei strömendem Regen.

Die am 5. Juli 1954 — also tags zuvor — eingeströmte arktische Polarluft hatte sich rasch erwärmt (Rückseitenwetter) und mit der örtlichen Ausstrahlung die Gewitterbildung auch im Raum Erlbach—Colditz begünstigt.

Bei der geringen Windstärke von 1,4 m/s und der herrschenden Windrichtung Süd-Süd-Ost blieb das Gewitter ostwärts der Mulde und bewegte sich längs des Flußlaufs der Mulde (Gewitternest).

2. Gelände und Geländebedeckung

Die betroffene 15-kV-Mittelspannungsfreileitung verläuft von der Station Erl 1 nach Station Erl 2 in südwestlicher Richtung in einer Höhenlage von 230 bis 235 m über N.N. Die höchste Erhebung befindet sich in nördlicher Richtung 575 m von der Leitung entfernt und liegt 270 m über N.N.

Das Gelände um die Leitung ist mit Wiesen und Ackerland durchzogen. Auf den Äckern stand das Getreide [illegible] auf dem Halm, zum Teil stand es in Garben.

Die Baumreihen und die Bauerngehöfte des Dorfes Erl stehen in dem Gelände alle tiefer als die höchste Bodenerhebung, die frei ist von jeglicher Bepflanzung. Die Baumreihen und die Bauerngehöfte stehen auch tiefer als die Mastkopfspitzen der 15-kV-Mittelspannungsleitung.

3. Wasseradern (Bild 1)

Zur Klärung der Blitzeinschläge wurde das Gelände in unmittelbarer Nähe der Leitungsführung mit der Wünschelrute abgesucht. Die verwendete Rute besteht aus 5 mm Stahldraht, an deren Ende Pendel in Form von kleinen Kupferblechplatten an Stahldrähten aufgehängt sind (Bild 2).

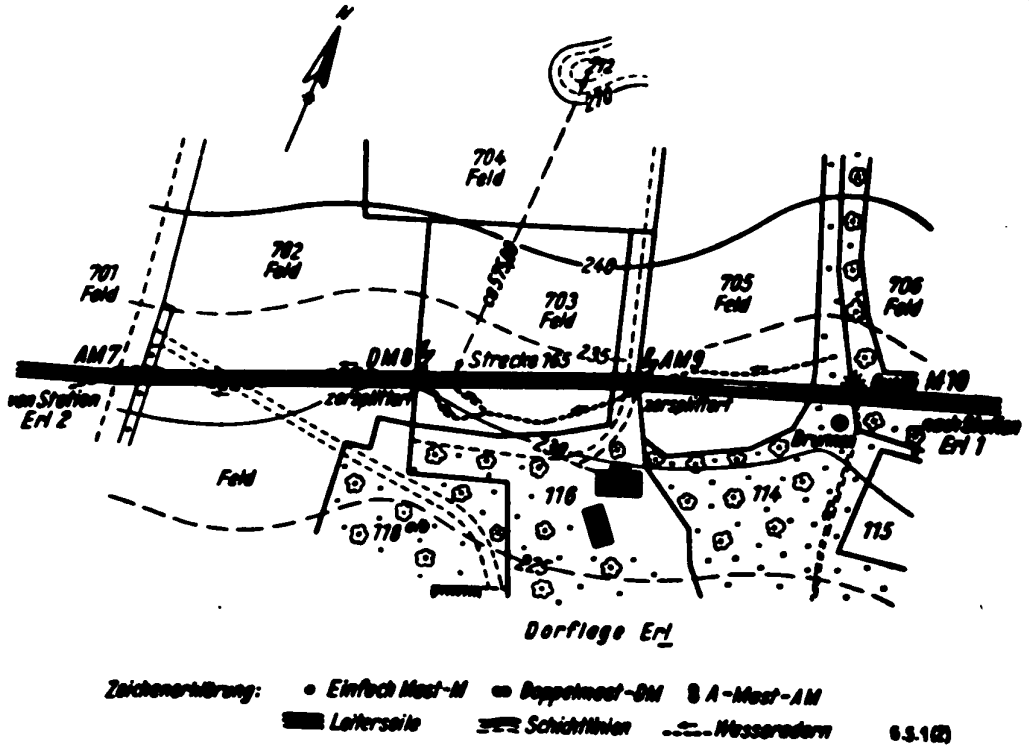


Bild 1. Verlauf der Wasseradern — Kartenausschnitt

Auf dem Flurstück 710a/b wurde eine Quelle vorgefunden, deren Oberwasser sich in das Dorf Erl und weiterhin in den Wasserlauf ergießt. In unmittelbarer Nähe südlich von der Quelle auf dem Flurstück 114 befindet sich ein Brunnen.

Mit Hilfe der Wünschelrute wurde der Verlauf einer starken Wasserader längs der Leitung und in unmittelbarer Nähe der betroffenen Holzmasten Nr. 8 und 9 festgestellt.

Die Wasserader verläuft nördlich der Quelle auf dem Flurstück 705 in 3 m Entfernung an dem A-Mast Nr. 9 vorbei nach dem Flurstück Nr. 703 und verzweigt sich dort. Die Zweige laufen dann direkt zum Doppelmast Nr. 8 und vereinigen sich in 3 m Entfernung von diesem. Die vereinigte Ader läuft dann weiter unter der Leitung über das Flurstück 702 zum A-Mast Nr. 7.

Hierbei ist, wie dies oft festgestellt wurde, die Tatsache zu verzeichnen, daß die Richtung von Wasseradern parallel zu oberirdischen Flüssen oder Bächen verläuft. Die festgestellten Wasseradern verlaufen hier parallel mit dem Bach, der die Dorflage durchquert.

5. Schaltung des 15-kV-Netzes

Das 15-kV-Netz mit der Teilstrecke Erl 1 bis 2 war als Strahl geschaltet. Speisepunkt war das UW R. Der weitere Verlauf ging über die Schaltstation Kö, Station Lö mit dem Abzweig nach der Station Schw, der Fortgang über Station La bis zur Trennstelle in Station Meu (Bild 3).

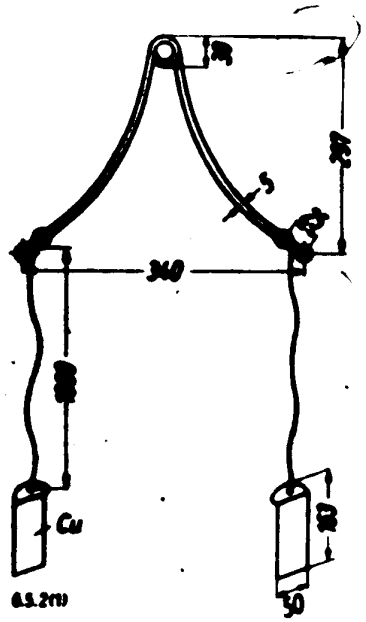


Bild 2. Stahl-Wünschelrute mit Pendeln

6. Überspannungsschutz

Vor dem UW Ro, das eine Kabelausführung von 0,4 km besitzt, ist kein Überspannungsschutz eingebaut. Desgleichen nicht am Ende der Leitung an den Trennstellen in Station Meu und Station Schw. Vor und hinter der Station Lö sind im Zuge der Leitungsführung jeweils an dem ersten Mast je drei Löschrohrableiter-Aufhängungen eingebaut. Angesprochen haben die Löschrohre der Leiter *R* und *S* der abgehenden Leitung in Richtung Station Rü und Station Erl.

6. Masten und Armierung

Die Gesamtstrecke besteht aus Holzmasten von durchschnittlich 12 m Länge. Die Postkreuzungs- und Straßenkreuzungsmasten sowie Eckmasten sind als Stahlgittermasten ausgebildet. Die Leiterseile sind im Dreieck angeordnet. Der Leiterseilabstand beträgt 1,3 m. Die Leitung besitzt durchgängig kein Erdseil.

Die Armierung besteht aus Flacheisenkonsolen mit Isolatoren VHD 20 auf geraden Stützen. Die Konsolen sind nicht untereinander verbunden und sind auch

nicht geerdet. Die Masten sind teerolimprägniert und stehen seit dem Jahre 1912 (gekennzeichnet durch Bleiplomben).

Die Doppelmasten — auch der vom Blitzschlag getroffene Doppelmast Nr. 8 — haben U-Eisen-Betonfüße, die folgendermaßen gebaut sind:

Zwei U-Eisen NP 24 sind mit dem Doppelmast durch Bolzen verschraubt und in die Mastgrube eingesetzt. Danach ist ein Betonsockel eingebracht worden, der etwa 40 cm unter der Erdoberfläche endet.

Die Gesamtlänge der U-Eisen beträgt 3 m, bei einer Eingrabtiefe von 2 m, so daß die U-Eisen 1 m über dem Erdboden herausragen.

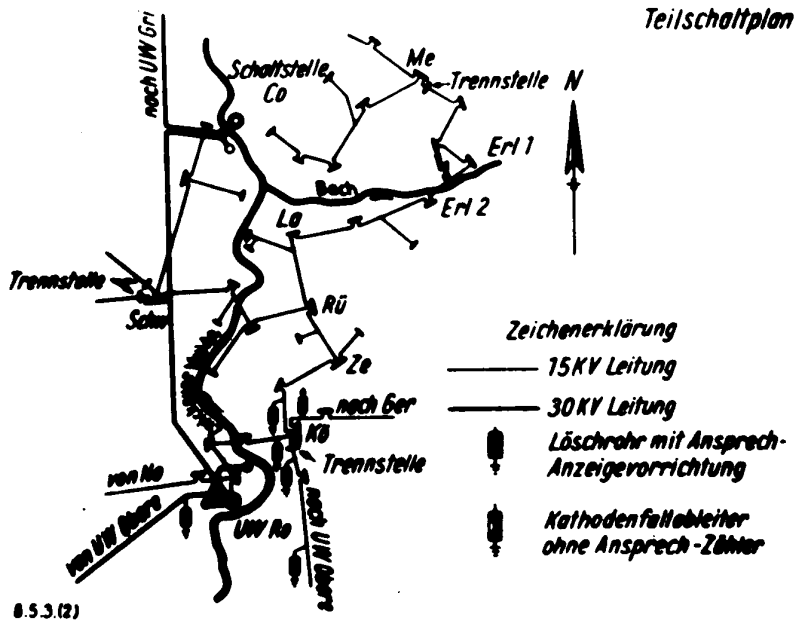


Bild 3. Schaltung des 15-kV-Netzes

Die Erdübergangswiderstände, gemessen mit der Gleichstrom-Meßbrücke, betragen

linkes U-Eisen in Richtung zum A-Mast 7 35,3 Ω,
rechtes U-Eisen in Richtung zum A-Mast 9 24,5 Ω.

Der Summen-Erdübergangswiderstand beider U-Eisen wurde mit 21 Ω gemessen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Messungen im September 1954 in einer Periode trockenen Wetters vorgenommen wurden.

Belegt ist die 15-kV-Teilstrecke Erl 1 bis 2 mit 25 mm² Cu-Seil.

7. Blitzeinschläge und Auswirkungen

Die beiden Maste, der A-Mast Nr. 9 und der Doppelmast Nr. 8, wurden von je einem Blitz getroffen.

Es erfolgte darauf 11.27 Uhr die Auslösung des Streckenschalters im UW Ro, der nach 4 min, 11.31 Uhr, wieder eingeschaltet wurde. Eine weitere Auslösung erfolgte nicht; die Strecke blieb anstandslos in Betrieb.

...kungen am A-Mast Nr. 9 zeigt Bild 4. Der eine Ständer des A-Mastes ...teren Konsol bis zur Erdoberfläche in kleine und kleinste Teile ge-... Umkreis von 40 bis 50 m verstreut umherlagen.
...schlagstelle standen nur noch Splitter von rd. 1 m Höhe.

Bild 4. Beschädigter A-Mast Nr. 9 (Mastkopf und Mastfuß)

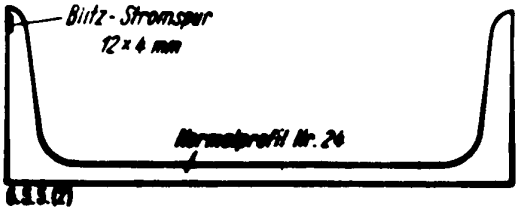


Bild 5. Blitzstromspur auf U-Eisenfuß

Schnitt mittels Profilschere durchgeführt, Querschnittsfläche mit tiefen Rostnarben durchsetzt

Weder an den Leiterseilen, noch an den Isolatoren waren Beschädigungen festzustellen. Da das Konsol noch an dem oberen Mastteil hängengeblieben ist, war die Leitung nach dem Blitzeinschlag noch betriebsbereit, so daß nach dem Wiedereinschalten die Leitung in Betrieb blieb.

Der Doppelmast Nr. 8 war über seine Länge von dem unteren Konsol bis etwa 2 m über dem U-Eisen vollständig durch Längs- und Querrisse zersplittert.

Über die letzten 2 m des unteren Teils führt eine Blitzbahn, die auf eine Stromspur auf dem Schenkel des U-Eisenquerschnitts zeigt.

Diese Stromspur hat eine flächenhafte Ausdehnung von 12 mm Länge und durchschnittlich 4 mm Breite (Bild 5). Diese Fläche war gegenüber der allgemeinen Querschnittsfläche etwas erhöht. Die Stromspur ist mit einer größeren Anzahl einzeln scharf voneinander getrennter Schmelzpunkte, nur durch eine starke Lupe zu erkennen, durchsetzt. Diese läßt auf eine negative Entladung von langer Entladungsdauer ($\geqq 100\ \mu s$) schließen [1].

Die Leiterseile und Isolatoren waren auch an diesem Mast nicht beschädigt und haben die Wiederinbetriebnahme der Leitung nicht beeinträchtigt.

Im UW Ob und den Stationen auf der Strecke und an den Trennstellen — Station Schw und Station Mon — waren keinerlei Schäden zu verzeichnen.

8. Zusammenfassung

Da es sich bei der 15-kV-Leitung Erl 1 bis 2 um eine Holzmastleitung ohne Erdseil handelt, deren Traversen nicht miteinander verbunden und nicht geerdet sind, mußte erwartet werden, daß die außerordentlich hohe elektrische Festigkeit der Holzmasten einen guten Schutz gegen die Folgen direkter Blitzschläge bildet.

Die praktischen Erfahrungen früherer Fälle haben dagegen gezeigt, daß dem nicht immer so ist.

Setzt man voraus, daß die Mindeststoß-Überschlagspannung der Masten 300 kV/m beträgt[1]), so ergibt sich bei einer Länge des Mastes von 10 m über Erdboden eine elektrische Festigkeit von $10 \cdot 300 = 3000$ kV.

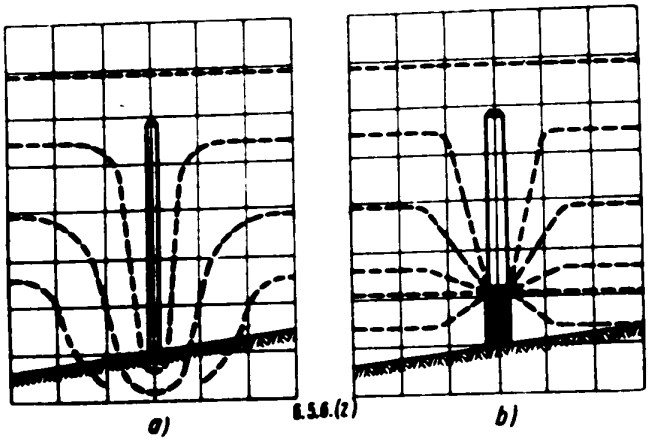


Bild 6. Verlauf der Niveaulinien um Holzmasten

a) um einen Holzmast (AM 9), b) um einen Holzmast mit U-Eisen-Füßen (DM 8)

Bei einem Wellenwiderstand der Leitung gegen Erde von 500 Ω genügt schon ein Strom in jeder Richtung von 6 kA, um diese Spannung hervorzubringen ($5 \cdot 6 = 3$ MV), also ein Blitzstrom von $2 \cdot 6 = 12$ kA.

Nach statistischen Unterlagen überschreiten 80% aller Blitzschläge diesen Wert.

Bei einem gut isolierten Mast, das ist bei den beiden betroffenen Masten der Fall, werden die Niveaulinien nach unten gesenkt, während bei einem Mast mit einem mittleren Erdübergangswiderstand die Niveaulinien gehoben werden (Bild 6).

Bei dem Doppelmast 8, der bis zu 1 m über Erde zur Erhöhung der Standsicherheit mit zwei U-Eisen verstärkt ist, und die einen Erdübergangswiderstand von rd. 21 Ω besitzen, ist dies zumindest bis zu der Höhe von 1 m über Erde der Fall, d. h. also, daß die Niveaulinien verzerrt sind.

Die an den Masten in unmittelbarer Nähe vorbeilaufenden Wasseradern rufen ihrerseits eine Störung des elektrischen Feldes und somit auch eine Störung der Äquipotentialflächen hervor, was eine erhöhte Leitfähigkeit zur Folge hat, zumal die Niederschlagsmenge in den zuvorliegenden Wochen außerordentlich hoch war (Bild 7).

---

[1]) Nach Prof. *A. Roth* 450 bis 600 kV m, gemessen mit Wellen von 0,25/20, dies entspricht etwa 350 bis 500 kV m bei Welle 1 50.

Die in Abschnitt 3 beschriebenen Wasseradern beeinflussen durch ihre gute Leitfähigkeit dicht über dem Erdboden die letzte Rückstufe des vorwachsenden Leitwegs bzw. die lokale Verteilung der Blitzbüschel und wirken nicht nur ableitend, sondern ziehen auch hinreichend viel Elektrizitätsmengen (Blitz-) auf sich, um das niedrige Potential der Erde festzuhalten und dadurch einen Teil des Blitzkopfes auf sich zu ziehen.

Die Masten über bzw. in unmittelbarer Nähe der Wasseradern stehen, wählten Büschel bzw. die Blitzäste die Masten als Einschlagstellen. Eine Begünstigung weiteren Weg des Blitzes bestand durch die U-Eisen-Verstärkungen bei immerhin relativ niedrigen Erdübergangswiderstand von 21 Ω.

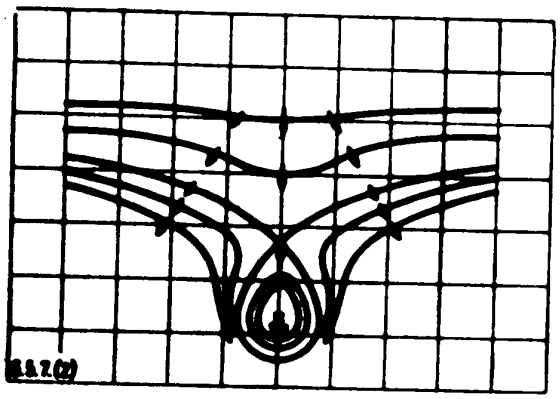


Bild 7. Äquipotentialflächen um eine Wasserader

Dr.-Ing. G. LEHMANN, Über die Ursachen der Häufung von Blitzeinschlägen an gewissen Stellen von Hochspannungsleitungen

Das Ansprechen der Löschrohrableiter im Zuge zur Speisestelle UW Ro in der Station Kö kann nicht in unmittelbaren Zusammenhang mit dem Blitzeinschlag gebracht werden, da eine zeitliche Feststellung des Ansprechens nicht gegeben ist. Außerdem beträgt die dazwischenliegende Leistungslänge 10 km.

Es muß hierbei vielmehr in Erwägung gezogen werden, daß in Auswirkung des Gewitters in dem dortigen Raum weitere atmosphärische Entladungen Überspannungen auf die Leitung übertragen haben, die von den Löschrohren abgesenkt werden sind.

9. Getroffene Vorkehrungen

Als Vorkehrung zur Verhinderung künftiger Mastenzersplitterung sind an den Masten 8 und 9 und zusätzlich an den benachbarten Masten 7 und 10 Parallelfunkenstrecken, wie von *Roth* [3] angegeben, eingebaut worden (Bild 8).

Derartige Schutzfunkenstrecken basieren auf der Überlegung der zulässigen Beanspruchung des Holzes — vgl. Abschnitt 8 —, daß ihre Schlagseite höchstens den 0,35fachen Wert der zu schützenden Holzmastlänge betragen darf und daß ihre Überschlagstoßspannung unter der Überschlagstoßspannung der eingebauten Isolatoren liegt.

Daraus ergibt sich für die 15-kV-Leitung folgendes:

Eingebaute Isolatoren VDH 20		Parallelfunkenstrecke 200 mm	
Überschlagstoßspannung			
negativ	positiv	negativ	**positiv**
195 kV_s	**170 kV_s**	**180 kV_s**	**150 kV_s**

Die Überschlagstoßspannungen der Parallelfunkenstrecke liegen also für negative als auch für positive Werte unter den Werten der eingebauten Isolatoren.

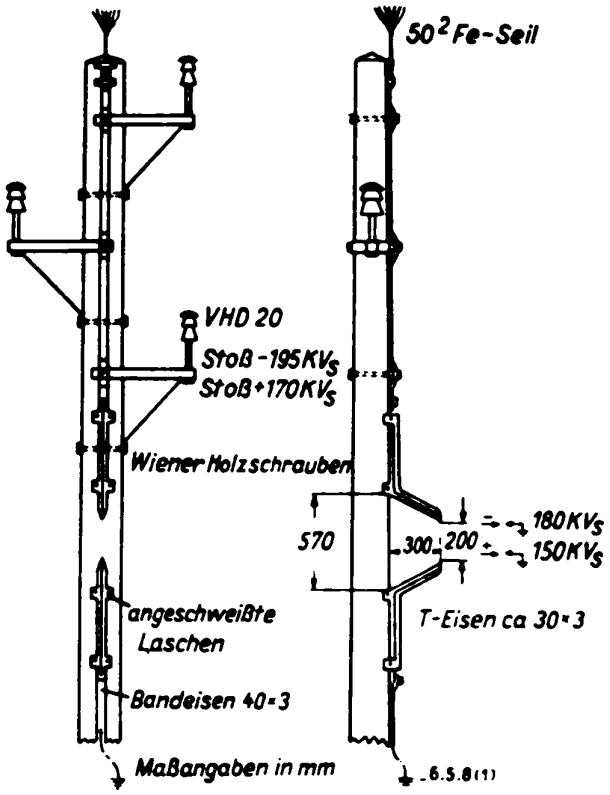


Bild 8. Schutzfunkenstrecke gegen Zersplitterungen von Holzmasten

Nach einem Vorschlag von Prof. A. Roth

Bei einer zu schützenden Holzlänge von 570 mm ist die **Forderung**

$$\frac{\text{Schlagweite der Parallelfunkenstrecke}}{\text{zu schützende Holzlänge}} = \frac{200}{570} = 0{,}35 \text{ erfüllt.}$$

Derartige Funkenstrecken sind seit vier Jahren an solchen **Masten eingebaut**, die durch Blitzschläge zersplittert worden sind. Durch eingebaute **Filmkörbe wurde**

festgestellt, daß weitere Blitzeinschläge stattgefunden haben. Die Filmkörbe waren verbrannt, ohne daß an den Masten Beschädigungen eingetreten sind.

Die Erdübergangswiderstände der Erdung müssen selbstverständlich niedrig sein und den Vorschriften für Erdungen entsprechen. Dies hat in keinem Fall Schwierigkeiten bereitet, da durch das Vorhandensein der Wasseradern hierzu die Voraussetzungen gegeben waren.

Literatur

[illegible], R.: VDE-Fachberichte 10 (1938), S. 35 und ETZ (1939), S. 133.

[illegible], G.: „Über die Ursachen der Häufung der Blitzeinschläge an gewissen Stellen von Hochspannungsleitungen."

[illegible], A.: Hochspannungstechnik (1950), S. 361 und 573.

6.6 Zum Problem des Überschlages von Isolatoren bei Verschmutzung und Feuchtigkeit[1])

Dipl.-Ing. *O. H. Schmidt*, Bad Klosterlausnitz (Thür.)

Die Steigerung der Übertragungsspannungen läßt die Isolationsminderung an Isolatoren durch Oberflächenfremdschichten (Tau, Nebel und Verschmutzung) als Störungsursache stärker in Erscheinung treten. Die bisher übliche Bemessung der Freiluftisolation nach der Regenüberschlagspannung, die sich — abgesehen von einigen Sonderfällen — für Mittelspannungsnetze durchaus bewährt hat, scheint bei Betriebsspannungen ab 110 kV nicht mehr den praktischen Betriebsverhältnissen gerecht zu werden, sobald Tau-, Nebel- und Verschmutzungseinflüsse wirksam werden. Aus diesem Grunde beginnt man seit einiger Zeit die Frage zu diskutieren, ob nicht eine neue Bemessungsgrundlage für die Isolation gefunden werden muß, die den erwähnten Einflüssen besser Rechnung tragen kann. Es ist in den letzten zwei Jahrzehnten viel Beobachtungsmaterial zusammengetragen worden, das durch zahlreiche Laboratoriumsmessungen ergänzt etwas mehr Licht in den komplizierten Überschlagsmechanismus bei Anwesenheit von Oberflächenfremdschichten gebracht hat und neue Gesichtspunkte für die Bemessung und Prüfung der Isolatoren aufzeigt, die es auszuwerten gilt.

Im ersten Teil des Referats wurden daher aus dem umfangreichen Beobachtungs- und Versuchsmaterial einige besonders wichtig erscheinende Ergebnisse behandelt.

Die ersten grundsätzlichen Arbeiten von *Obenaus*, *Weicker*, *Estorff* und anderen hatten seinerzeit ihren Niederschlag in den VDE-Leitsätzen 0448 vom Jahre 1940 gefunden. Wir wissen heute, daß die darin festgelegte Methode der Nebel- und Verschmutzungsprüfung nicht vollauf befriedigt hat, daß sie aber bei Verwendung als reine Vergleichsmethode noch brauchbare Schlüsse über das zu erwartende Verhalten neuer Isolatorenformen bei Verschmutzung und Nebel im Vergleich zu Isolatoren zuläßt, deren praktische Bewährung bekannt ist. Ansätze zu einer neuen Prüfmethode liegen zwar bereits vor, haben aber noch nicht zu einer Neugestaltung der Leitsätze VDE 0448 geführt.

Von den neueren Arbeiten sei zunächst die von *Schuepp* erwähnt, der die Überschläge bei Sonnenaufgang zu klären versuchte, über die *Meyer* umfangreiches statistisches Material aus einem Zeitraum von 20 Jahren veröffentlicht und ausgewertet hat. Die Schueppschen Untersuchungen wurden in einem Gebiet durchgeführt, das frei von industriellem Staub war, und ergaben, daß Feuchtigkeitsniederschläge an praktisch sauberen Isolatoren nicht die Ursache für Überschläge bei Betriebsspannung sein können. *Schuepp* vertritt auf Grund seiner Beobachtungen die Ansicht, daß Ungleichmäßigkeiten des Tau- oder Nebelniederschlages auf den Isolatoren zu einer ungleichmäßigen und ungünstigen Spannungsverteilung führen. Die „trockenen" Teile des Isolators bzw. der Kette haben daher einen größeren Teil der Betriebsspannung zu tragen, der zur Zündung eines Teilüberschlags an diesen „Trockenstellen" und daraus folgend zur Einleitung des Vollüberschlags genügt. Die ungleichmäßige Feuchtigkeitsverteilung führt *Schuepp*

[1]) Kurze Inhaltsangabe des Referats.

auf die vorliegenden Wärmeausstrahlungsverhältnisse, Trocknungseffekte der Leckströme und Wirkungen des elektrostatischen Feldes zurück.

Die sehr umfangreichen Arbeiten von *Estorff*, *v. Cron* und *Läpple* gingen vom Studium der Verdampfungsvorgänge an Wasserhäuten aus; hierbei wurden verschiedene Vorentladungsarten erkannt, von denen die stromschwachen Glimmentladungen als Abtrocknungsentladungen zu bezeichnen sind, während der Zündüberschlag aus stromdichten, aus den Leckströmen gespeisten Vorentladungen entwickelt. In ihrem CIGRE-Bericht 1954 (Nr. 218) stellen die gleichen Verfasser durch Versuche an 110-kV-Stützern ebenfalls fest, daß Feuchtigkeitsbeläge auf sauberen Isolatorenoberflächen nicht in der Lage sind, die Überschlagspannung von Isolatoren auf sehr niedrige Werte abzusenken. Erst wenn kapillare und hygroskopische Fremdschichten auf den Oberflächen vorhanden sind, werden die Überschlagspannungen so stark herabgesetzt, daß die Isolatoren bei normaler Betriebsspannung gefährdet sein können. Insbesondere wurde von ihnen festgestellt, daß Vorentladungen an der Fremdschicht chemische Reaktionen auslösen, die zu einer beträchtlichen Leitfähigkeitserhöhung führen und die Oberflächenspannung der Feuchtigkeitsbeläge ändern. Als stark überschlagfördernd sind alkalischhaltige Fremdschichten anzusehen. Isolatorenform, Schirmanordnung und -ausbildung beeinflussen den Überschlagmechanismus. Vielschirmisolatoren bewirken eine große Stabilität, da die Schirmunterbrechung die Fremdschicht zu vielen, kurzen Entladungsstrecken teilt, die einen hohen Spannungsverbrauch haben und strombrechend wirken. Die neuesten Untersuchungen stammen wohl von *Bevrey*, der im Laboratorium der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen sehr ausführliche oszillographische Aufnahmen der Leckströme bei Nebelbeaufschlagung auf verschiedenen Isolatoren durchführte. Er stellte fest, daß sich bei konstant anliegender Betriebsspannung Leckströme ausbilden, die aus einem Grundstrom und häufigeren kurzzeitigen Entladungsstromstößen bestehen. *Bevrey* stellte fest, daß die Höhe des Grundstromes in der Fremdschicht nicht entscheidend ist, daß aber dem Überschlag eine bestimmte Höhe vorangehender Entladungsstromstöße zugeordnet zu sein scheint. Die Arbeit führt zu der Erkenntnis, daß „das Fremdschichtproblem ein Problem der Trockenzonenbildung ist", die für die Spannungsverteilung auf der Isolatorenoberfläche und damit für den Überschlag bestimmend ist, worauf bereits *Obenaus* hingewiesen hatte.

Der zweite Teil des Referats war den bisher erzielten Ergebnissen von Verschmutzungsuntersuchungen gewidmet, die z. Z. in der Entwicklungs- und Forschungsstelle der Keramischen Werke Hermsdorf durchgeführt werden. Unabhängig von den obenerwähnten Arbeiten und aufbauend auf den früheren Arbeiten an dieser Stelle wurde 1952 ein neuer Schmutzlang-Stabisolator entwickelt, über dessen Verhalten bei Laboratoriumsprüfungen und im praktischen Betrieb berichtet wird. Weitere Versuchsreihen, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energetik durchgeführt werden, haben zum Ziel, unter Berücksichtigung der neueren Erkenntnisse den Einfluß verschiedener Isolatorenanordnungen innerhalb einer Kette sowie der Lage der Isolatoren im Raum auf die Nebelüberschlagspannung bei Verschmutzung zu untersuchen. Auch die Frage der Oberflächenbehandlung durch Silikone und ihre Wirkung auf die Überschlagspannung wurde behandelt. Als Beitrag zur Neufassung der VDE-Leitsätze 0448 wurde über Versuche an verschmutzten Isolatoren berichtet, bei denen im Gegensatz zur bisherigen Prüfpraxis mit konstant gehaltenen Prüfwechselspannungen gearbeitet wird.

6.7 Möglichkeiten und Grenzen der Kupfereinsparung an stromführenden oder unter Spannung stehenden Armaturteilen

Obering. *K. Schemelli*, Radebeul

Durch den laufend steigenden Bedarf an Kupfer und die zu geringen Deckungsmöglichkeiten dieses Bedarfs hat die Frage nach dem Austausch des Kupfers durch Kupferlegierungen oder andere Leitmetalle in den letzten Jahrzehnten ständig an Bedeutung gewonnen.

In den Jahren des zweiten Weltkrieges wurden von der damaligen Regierung drakonische Maßnahmen zur Einsparung von Kupfer ergriffen, wobei man vor unzureichenden Behelfsmaßnahmen und technisch nicht vertretbarem Austausch gegen ungeeignete Ersatzstoffe nicht zurückschreckte. So wurden bei der sogenannten „Kupferaktion" im Jahre 1942 Kupferleitungen durch Eisenleitungen ersetzt und auch die Abzweigklemmen bestanden aus Eisen. Man begnügte sich mit einer mehrjährigen Lebensdauer dieser Leitungen und nahm die durch die mangelnde Leitfähigkeit bedingten hohen Stromwärmeverluste mit in Kauf. Diese Leitungen sind meist noch heute in Betrieb. Sie sind eine ständige Sorge der Versorgungsbetriebe.

Obgleich wir in der DDR im Mansfelder Kupferschieferrevier eine heimische Kupferquelle besitzen, ist auch heute Sparsamkeit im Kupferverbrauch geboten. So wurde mit der Verwendungsverbotsliste Nr. 9 die Verwendung von Kupfer überall dort untersagt, wo eine Ersatzmöglichkeit durch andere Werkstoffe gegeben ist.

Im Leitungsbau, bei dem auf beste elektrische Leitfähigkeit der stromführenden Metallteile nicht verzichtet werden kann, ist man in großem Umfang zur Verwendung von Aluminium übergegangen. Besonders im Freileitungsbau verwendet man schon seit Jahrzehnten Aluminium und seine Legierungen in Form von Reinaluminium-, Aldrey- und Stahl-Aluminium-Seilen. Dagegen hat sich Aluminium im Apparatebau, Schalterbau, Transformatoren- und Motorenbau und bei der Bestückung von Durchführungs-Isolatoren bisher nur wenig durchsetzen können. Die Gründe hierfür sind verschiedener Art. E-Kupfer hat eine um 60% höhere Leitfähigkeit als Aluminium, wodurch der Raumbedarf bzw. der Querschnitt bei gleicher Strombelastung kleiner ist. Bei allen Geräten, bei denen mit Zutritt von Feuchtigkeit zu den Kontaktstellen gerechnet werden muß, zieht man Kupfer wegen der geringeren Störungsgefahr dem Aluminium vor. Es ist ja bekannt, daß sich Aluminium an der Luft sofort mit einer isolierenden Oxydhaut überzieht, wodurch der Kontaktwiderstand erhöht wird, was zu zusätzlicher Erwärmung und vermehrter Oxydation sowie schließlich zur Korrosion und Zerstörung der Klemmen und Leitungen führen kann. Zudem neigt Aluminium dazu, unter ständiger Druckbelastung zu fließen, wodurch sich der Kontaktdruck verringert, was wiederum zur Widerstandserhöhung führt. Versuche haben gezeigt, daß Reinaluminium schon bei einer Dauerbelastung von rd. 3 kg/mm² zu fließen beginnt.

Wo also auf Kupfer aus Gründen des Raumbedarfs, der größeren Leitfähigkeit, auf Grund der größeren Festigkeit oder Korrosionsbeständigkeit nicht verzichtet werden kann, taucht die Frage auf, ob an Stelle des reinen Kupfers nicht Kupferlegierungen als kupfersparend verwendet werden sollen.

Hierzu Zusammenhang ist es interessant, einmal unter dem Gesichtspunkt gleichen Widerstandes den Aufwand von Kupfer und Legierungsbestandteilen verschiedenen Legierungen zu vergleichen (Tafel 1).

Aufwand von Legierungsmetallen für Kupferlegierungen zur Erzielung des gleichen ohmschen Widerstandes wie dem des Kupfers

Voraussetzung: $\text{Leg.-Vol.} = \text{Ku.-Vol.} \dfrac{\text{Ku.-Leitwert}}{\text{Leg.-Leitwert}}$

$\text{Leg.-Gewicht} = \text{Leg.-Vol.} \cdot \text{Leg.-Wichte}$

$\text{Legierungswichte} = \text{Leg.-Gewicht} \cdot \text{Legierungsanteil [\%]}$

Wichte: Kupfer 8,9; Zink 7,1; Zinn 7,3; Al 2,7; Blei 11,3.

Legierung		Legierungsaufwand für gleichen Widerstand wie Kupfer		Gewichtsanteile				
				Kupfer		Zink		Weitere
Leitwert %	Wichte kg	Volumen dm³	Gewicht kg	Gewicht etwa %	Gewicht kg	Gewicht etwa %	Gewicht kg	Leg.-Met. kg
[illegible]	8,9	1	8,9	100	8,9			
17,4	8,96	3,2	27,2	58	15,8	42	11,4	
17,25	8,4	3,3	27,3	60	16,4	40	10,9	
14,65	8,44	3,6	30,3	63	19,1	37	11,2	
9,5	8,8	5,9	51,8	94	48,7			3,1
9,1	8,4	6,2	51,7	96	49,7			2,0
8	8,6	7	60,2	85	51,2	7	4,2	4,8

Tafel 1 gibt den Materialaufwand wieder, wie er sich rechnerisch aus den Wichten und Leitfähigkeiten der verschiedenen Legierungen ergibt, wenn man das Kupferquerschnittsvolumen mit 1 dm³, die Wichte mit 8,9 kg/dm³ und die Leitfähigkeit mit 56 s zugrunde legt.

Aus diesem Vergleich geht hervor, daß man zur Erzielung des gleichen ohmschen Widerstandes wie bei Kupfer ein Mehrfaches des Kupferquerschnitts bei Verwendung von Kupferlegierungen benötigt, und zwar im umgekehrten Verhältnis der Leitfähigkeiten.

So hat z. B. Messing Ms 60 eine Leitfähigkeit von 17,25 s gegenüber einer solchen von 56 s bei Kupfer. Messing benötigt also den 3,25fachen Querschnitt von Kupfer. Rechnet man nun den Messingaufwand nach, so ergibt sich, daß man rd. 27,2 kg Messing benötigt, um 8,9 kg Kupfer zu ersetzen. In diesen 27,2 kg Messing sind aber 60 % Kupfer mit einem Gewicht von rd. 16,4 kg enthalten. Man muß also rd. 7,5 kg Kupfer zusätzlich aufwenden, um die Verschlechterung der Leitfähigkeit durch die Beigabe von Zink wieder auszugleichen. Noch krasser liegen die Verhältnisse z. B. bei Rg 5, das nur eine Leitfähigkeit von 8 s hat. Wie Tafel 1 zeigt, ist hier ein Aufwand von 60,2 kg Rotguß nötig, um den Leitwert von Kupfer mit 8,9 kg zu erreichen. Der Kupferaufwand beträgt hier bei einem Anteil von 85 % Ku 51,2 kg Kupfer, d. h. 42,3 kg Kupfer mehr, als wenn man reines Kupfer verwendet hätte. Diese Beispiele zeigen klar, daß man in solchem Fall Kupfer spart, wenn

man reines Kupfer verwendet. Diese Tatsache ist natürlich bekannt, aber die Gegenüberstellung ist trotzdem lehrreich.

Man kann gegen diese errechneten Zahlen einwenden, daß die Volumenvergrößerung auch vergrößerte Kühlflächen mit sich bringt. Im Prinzip bleibt jedoch die Tatsache bestehen, daß man bei Verwendung von Kupferlegierungen den Kupferaufwand vergrößern muß, um auf die Leitfähigkeit des Kupfers zu kommen.

Es gibt eine Reihe sehr gängiger und genormter Konstruktionen in der Elektroindustrie, die man unter diesem Gesichtswinkel einer Prüfung auf Daseinsberechtigung unterziehen sollte. Zu diesen gehören z. B. die gepreßten bzw. gegossenen Messing-Kabelschuhe nach DIN VDE 6220 und 6221 bzw. DIN 46220 und 46221.

Tafel 2. Kupferaufwand und Leitwert für Kupferblech-Kabelschuhe DIN 6211 und Messing-Kabelschuhe Ms 58 DIN 6220

Nennmaße der Kabelschuhe	Fertiggewicht ‰ Ku-Blech DIN VDE 6211 kg	Fertiggewicht ‰ Ms-Press. DIN VDE 6220 kg	Gewichtsanteil d. Leg.metalle der Ms-Kabelschuhe Kupfer kg	Gewichtsanteil d. Leg.metalle der Ms-Kabelschuhe Zink kg	Gewichtsverhältnis Ms Kabelsch. / Ku Kabelsch.	Volumenverhältnis Ms Ku	Errechneter prozentualer Leitwert der Ms-Kabelschuhe $\frac{\text{MsVol.} \times \text{MsLfw.}}{\text{KuVol.} \times \text{KuLfw.}}$ %
8× 7	13,5	44,0	25,5	18,5	3,25	3,45	107,5
8× 8,5	18,0	61,0	35,4	25,6	3,39	3,6	112
10×10	32,5	89,0	51,6	37,4	2,75	2,92	90,8
10×12	48,0	123,0	71,4	51,6	2,56	2,72	84,5
10×13,5	68,0	155,0	90,0	65,0	2,28	2,43	75,5
13×15	93,0	247,0	143,0	104,0	2,65	2,83	88,0
16×15	104,0	239,0	138,7	100,3	2,3	2,44	75,7
13×17	129,0	234,0	135,7	98,3	1,81	1,93	59,8
16×17	138,0	226,0	131,0	95,0	1,64	1,74	54,2

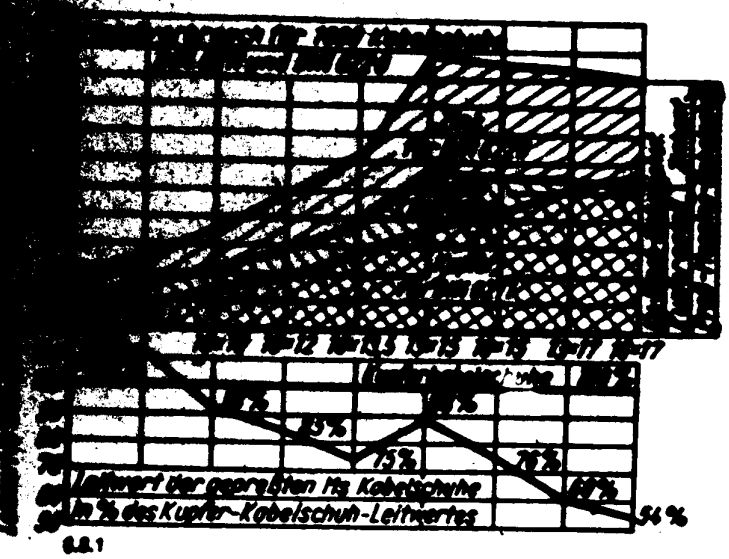
Tafel 2 zeigt nebeneinander das Gewicht der genormten Kupferblech-Kabelschuhe DIN VDE 6211 und der Messing-Kabelschuhe gleicher Größe nach DIN VDE 6220 sowie den Kupfergehalt dieser Kabelschuhe. Ferner ist die aus den Gewichten und Leitfähigkeiten beider Metalle errechnete Verschlechterung der Leitfähigkeit der Messing-Kabelschuhe trotz größeren Kupferaufwandes daraus ersichtlich. Bei der Kürze der Kabelschuhe spielt dies zwar eine untergeordnete Rolle, jedoch wird die Lötverbindung unnötig verschlechtert. Leider standen die Gewichtsangaben der Kabelschuhe nach DIN 46211 und 46220 noch nicht ganz zur Verfügung, so daß Tafel 2 die alten Vergleichswerte zeigt. Das Verhältnis dürfte aber bei den neuen Norm-Kabelschuhen etwa das gleiche sein.

Einige aus dieser Tafel entnommenen Werte seien nachstehend angeführt. Kupferblech-Kabelschuhe 8×7 wiegen je 1000 Stück 13,5 kg, entsprechende Messing-Kabelschuhe, gepreßt, je 1000 Stück 44 kg. Darin sind 25,5 kg Kupfer enthalten also 12 kg mehr als im Kupferblech-Kabelschuh. Bei den Kabelschuhen 13×15 mit einem Kupfergewicht von 93 kg je 1000 Stück und einem Messinggewicht von 247 kg beträgt der Mehraufwand an Kupfer bei dem Messing-Kabelschuh 55,0 kg. Außerdem wird Zink im Gewicht von 18,5 kg bzw. 104 kg für die beiden Größen benötigt. Das sind zwar kleine Zahlen, aber sie summieren sich bei dem großen Bedarf an Kabelschuhen.

1 stellt die Verhältnisse noch einmal graphisch dar. Die drei oberen Kurven Werkstoffverbrauch für verschiedene Kabelschuhgrößen. Kurve *I* zeigt aufwand der Kupferblech-Kabelschuhe nach DIN VDE 6211. Kurve *II* wesentlich höheren Kupferinhalt der Messing-Preßkabelschuhe gleicher nach DIN VDE 6220 und die Fläche zwischen den Kurven *II* und *III* chen Zinkaufwand in kg je 1000 Stück Kabelschuhe an. Hierbei sind verluste durch Abfall und Schmelzverluste nicht berücksichtigt.

zeigt die Leitwerte der Messing-Kabelschuhe, bezogen auf den Leit- Kabelschuhe = 100 %, errechnet aus dem Volumenverhältnis und der Leitfähigkeiten, z. B.

$$\text{Leitwert der Ms-Kabelschuhe } 8\times7 = \frac{\text{Ms-Volumen} \cdot \text{Ms-Leitwert}}{\text{Ku-Volumen} \cdot \text{Ku-Leitwert}}$$



. Metallverbrauch von Ku-Kabelschuh DIN VDE 6211 und Ms-Kabelschuh DIN VDE 6220 und ihre Leitwerte

Kurve zeigt sehr deutlich, daß z. B. bei dem Ms-Kabelschuh 16×17, der etwa gleiche Kupfergewicht enthält wie der Kupfer-Kabelschuh des gleichen Nennmaßes, der Leitwert nur 54 % des Kupfer-Kabelschuhes beträgt.

In diesem Zusammenhang muß auch auf die Bemühungen der letzten Jahre eingegangen werden, die genormten Kupfer-Kabelschuhe DIN 46211 noch weiter zu verkleinern. Die Festsetzung der heute genormten Abmessungen geschah 1944 unter dem Gesichtswinkel der höchstzulässigen Einsparung von Kupfer und Zinn. Eine weitere Verkleinerung bringt die Gefahr der Überhitzung und Auslötung und damit Störungen und Brandgefahr mit sich. Will man an dieser Stelle Kupfer sparen, so bietet sich meist die Möglichkeit, durch kürzeste Bemessung der Leitungslängen ohne Nachteile wesentlich mehr Kupfer zu sparen, als dies bei den Kabelschuhen, die sowie [illegible] Stelle der Leitung darstellen, möglich ist.

Die Verwendung von gepreßten Messing-Kabelschuhen ist also nur unter dem Gesichtswinkel einer größeren mechanischen Festigkeit vertretbar. Ähnlich liegen die Dinge bei vielen Konstruktionsteilen, die aus Gründen besserer Formbarkeit und Bearbeitbarkeit sowie aus Festigkeitsgründen aus Kupferlegierungen hergestellt werden.

Wenn hier auf das Verhältnis des Kupferaufwandes bei Kupferlegierungen unter dem Gesichtswinkel gleichen Widerstandes hingewiesen wird, so doch in der Erkenntnis, daß vielfach auf diese Legierungen nicht verzichtet werden kann und bei kurzen Armaturteilen der erhöhte Widerstand nicht so ins Gewicht fällt, wenn dann das Verhältnis der Leitfähigkeit nicht voll berücksichtigt wird.

Da die Forderung nach Kupfereinsparung schon seit zwei Jahrzehnten besteht, ist auf diesem Gebiet von der Industrie schon vieles und Grundlegendes unternommen worden. Auch im Fertigungsprogramm unseres Hochspannungs-Armaturenwerkes in Radebeul wurden wesentliche Kupfereinsparungen durch Konstruktionsänderungen besonders an Massenartikeln erzielt, ohne eine Verschlechterung in

Bild 2. Unimaxklemme aus Stahl mit Kupferbeilagen mit 25-mm²-Kupferseil, montiert bei 1200 A Strombelastung

Kauf nehmen zu müssen. So wurden z. B. die bekannten Unimax-Abzweigklemmen, die früher aus Kupfer mit Bronzeschrauben und Bronzemuttern hergestellt wurden, auf feuerverzinkten Stahl mit Kupferblechbeilagen sowie mit verzinkten Stahlschrauben umgestellt.

Bild 2 zeigt eine solche Klemme für ein 25-mm²-Seil bei einer Belastungsprobe mit einer Stromstärke von im Mittel 1200 A, also dem 10fachen des höchstzulässigen Stromes. Die Kupferseile kamen zum Glühen und brannten dann ab. Die Klemme selbst blieb so kalt, daß die Feuerverzinkung unbeschädigt blieb und in der Klemme keine Widerstandserhöhung eintrat. Die Klemme ist also trotz des weitgehenden Verzichts auf Kupfer durchaus betriebssicher. Das gleiche Prinzip wird schon seit Jahren auch auf die Stromklemmen zum Schließen der Stromschlaufen angewendet und hat sich bewährt. Da die Klemmen im Freien montiert sind, verhindert die vergrößerte Kühlfläche eine Überhitzung.

Man ist nun in der Kupfereinsparung noch einen Schritt weiter gegangen und hat nur noch eine Kupferschicht aufgespritzt. Diese Schicht besteht nach der Art ihrer Entstehung aus ineinander verfilzten, mit Oxydhäuten überzogenen Kupfer-Schmelzperlen. Wie Versuche gezeigt haben, ist diese Schicht porös und wasserdurchlässig. Sie kann also ein homogenes Blech nicht ersetzen.

In der Praxis wird man also nicht nur von den rechnerischen Werten der Leitfähigkeit ausgehen, sondern die Erfordernisse und evtl. die vertretbaren Zugeständnisse des Betriebes berücksichtigen dürfen. So ist man z. B. im Fahrleitungsbau dazu übergegangen, die Leitungs-Anschlußklemmen an die Fahrdrähte aus Temperguß herzustellen. Dies hat seine Berechtigung, da diese Anschlußklemmen in großen Abständen angebracht sind und den Strom vorwiegend nur dann übertragen, wenn ein Zug den Streckenabschnitt befährt. Die Inanspruchnahme ist intermittierend. Auch dort, wo an einer stromführenden Klemme ein Teil nur der Druckerzeugung dient, ist die Verwendung von Stahl oder

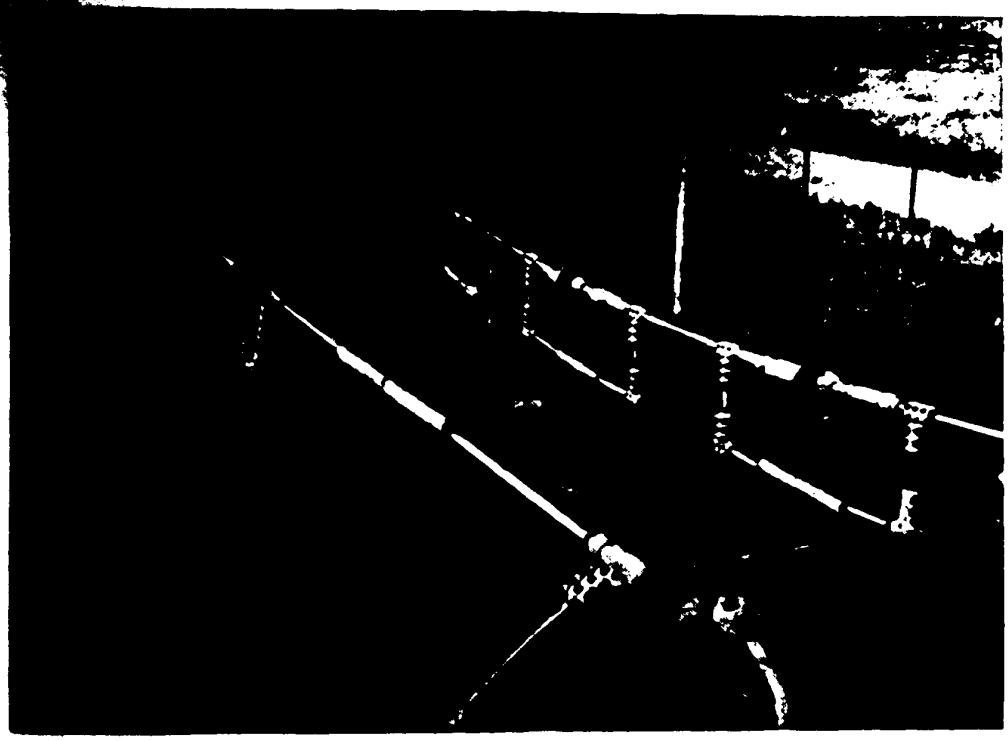


Bild 3. Versuchsfeld für Freileitungsarmaturen im Gelände des VEB Hochspannungsarmaturenwerk Radebeul für laufende Belastungsversuche

Temperguß möglich und angebracht. Allerdings muß hierbei berücksichtigt werden, daß eine stromführende Wechselstromleitung ein elektromagnetisches Feld um sich bildet, das in den umhüllenden Eisenteilen Wirbelströme erzeugt. Hierbei werden die Eisenteile erwärmt, was zu einer unerwünschten Überhitzung der Klemmstelle führen kann. Die Forderung, daß Kontaktstellen 40° Übertemperatur im normalen Dauerbetrieb nicht überschreiten dürfen, setzt der Verwendung von magnetischen Werkstoffen an stromführenden Leitungsteilen natürliche Grenzen.

Um alle diese Fragen klären zu können, sind im Hochspannungs-Armaturenwerk Radebeul umfangreiche Versuchsanlagen und Laboreinrichtungen vorhanden.

Bild 3 zeigt z. B. das im Freien und in der Nähe der Beiz- und Verzinkungsanlage aufgestellte Versuchsfeld für intermittierende Hochstrombelastung von Frei-

leitungsarmaturen. Die Anlage [illegible] Intervallen von rd. 2 h und mit 600 A Belastung.

Eine zweite gleichartige Anlage mit einer Belastung von 100 A dient zur laufenden Prüfung von Abzweigklemmen und Verbindern aller Art auf Betriebssicherheit. Diese Anlage ist schon seit etwa 20 Jahren im Dauerbetrieb. Die Armaturen und Klemmverbindungen werden laufend auf Veränderung ihres inneren Widerstandes geprüft.

Eine Salzsprühanlage für Korrosionsversuche, die zur Untersuchung von Schutzschichten wie auch von Al-Cu-Verbindungen und dergleichen dient, zeigt Bild 4.

Die Anlage besteht aus einer Kammer zur Unterbringung der Versuchsteile und einer Vorkammer, in der der Salzsprühnebel aus einer 3%igen Kochsalzlösung durch Nebeldüsen mittels Kompressor erzeugt wird. Das Versprühen geschieht rd. $^1/_2$stündlich mit $1^1/_2$ bis 2 min Dauer (nach DIN 4853).

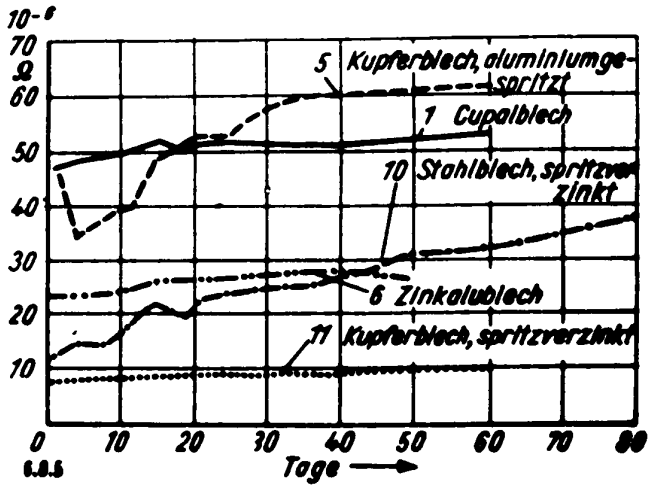


Bild 5. Korrosionsversuche mit Salzsprühnebel an Zwischenblechen für Al[illegible] Kupferverbindungen

Die Klärung eines wichtigen Problems, das in dieser Anlage in Angriff ge[illegible] wurde, konnte mit Erfolg durchgeführt werden. Es galt, als Ersatz für Cu[illegible] ein Zwischenblech zwischen Kupfer- und Aluminium-Kontaktteilen zu finden, die die Korrosion des Aluminiums verhindert. Bekanntlich neigen die direkten Verbindungen dieser beiden hauptsächlichsten Leitungsmetalle zu elektrischen Korrosionen, besonders wenn Feuchtigkeit hinzutritt. Es kommt zur Zerstörung des Aluminiums durch Elementbildung, was unter Umständen sehr unangenehme Störungen verursacht. Als Austausch für das in Westdeutschland hergestellte [illegible]blech, das früher als Zwischenlage an solchen Stellen verwendet wurde, wird durch das Aluminiumwerk Hettstedt ein Zink-Al-Blech hergestellt, das sich diesen Korrosionsversuchen gut bewährt hat.

Bild 5 zeigt noch Meßkurven einer Reihe anderer Kombinationen, die sich gut und beständig gezeigt haben. Die Werte wurden an Kontaktschienen aus [illegible] und Aluminium mit zwischengeklemmten Musterblechen 30×30×1 mm [illegible] einem Schraubendruck von 1 kg · mm⁻² gemessen. Das vom HAW Radebeul [illegible]wendete Zink-Al-Blech ist zur besseren Kenntlichmachung der Zinkschicht ge[illegible]

[illegible] verkupfert. Die Versuche haben gezeigt, daß diese Verbindung keine Zer-[illegible] aufweist. In dieser Frage der Elementbildung darf darauf hingewiesen [illegible], daß im Freileitungsbau schon seit Jahrzehnten Kupferleitungen in ver-[illegible] Hängeklemmen aufgehängt werden und Zerstörungen an den Berührungs-

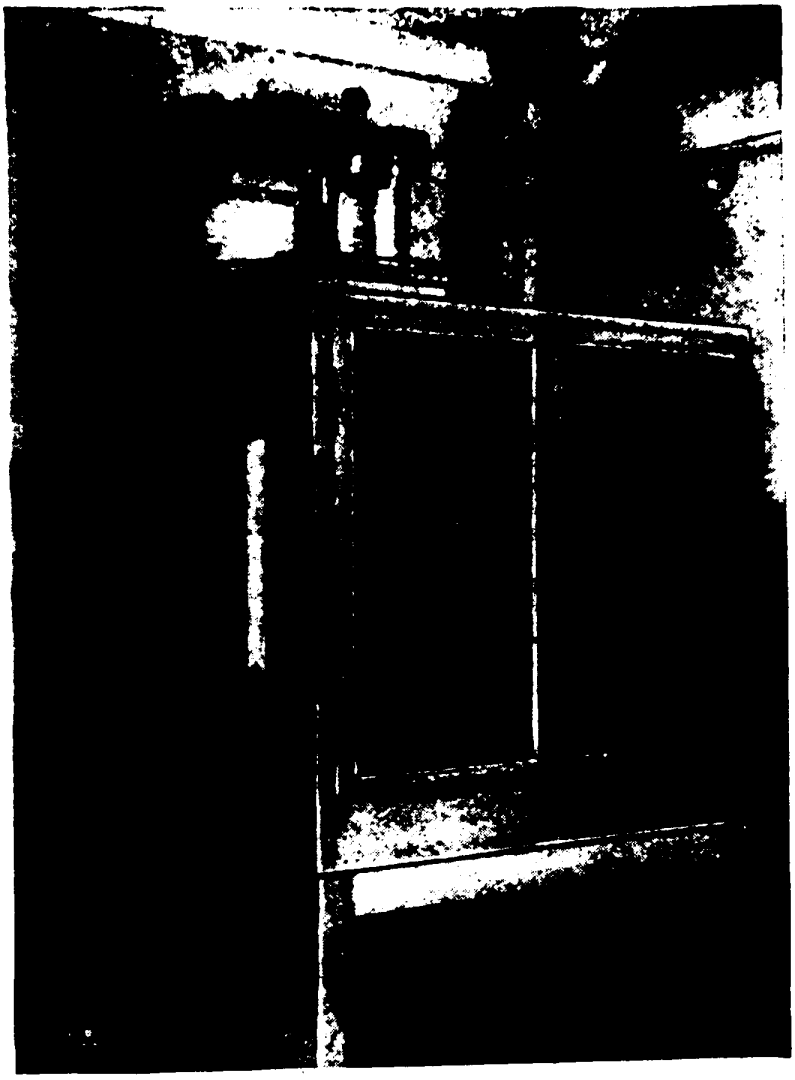


Bild 4. Salzsprühnebelanlage für Korrosionsversuche

stellen zwischen Kupfer und Zink trotz der Anwesenheit von Regenwasser und aggressivem Staub kaum aufgetreten sind.

Es ist festzustellen, daß das Verwendungsverbot Nr. 9 eine Reihe Fragen des Kupfereinsatzes offen läßt. Da sie die verschiedensten Verwendungsgebiete des Kupfers berühren, gehen sie weit über den Rahmen dieses Vortrages hinaus, weshalb ich mich auf das mir bekannte Gebiet beschränkt habe.

Eine Frage [illegible] das Verwendungsverbot für Splinte und Sicherungen aus Kupfer. Diese sind ihrem Charakter nach Organe, denen die Sicherung von Bolzen und Schraubenverbindungen zufällt. Im Freileitungsbau ist ohne zuverlässige und wetterbeständige Sicherungen der vielen Bolzen- und Schraubenverbindungen kaum auszukommen, da solche Sicherungen, die nach Tausenden und Zehntausenden zählen und meist unter Spannung stehen, nicht überwacht werden können. Hierfür hat sich bisher Kupfer am besten bewährt, da bei verzinktem Eisen die Verzinkung an der Biegestelle platzt und der Splint dann rostet, Rundsplinte aus Aluminium sind zu weich und aus Alu-Legierung zu spröde. Es wird sich also als nötig erweisen, durch Ausnahmegenehmigungen an solchen Stellen die Verwendung von Kupfersplinten zu ermöglichen. Blechsicherungen aus Aluminium werden überall dort eingesetzt, wo nicht durch Anwesenheit von Kupfer oder kupferhaltigem Wasser eine Zerstörung derselben durch Korrosion zu befürchten ist.

Der kurze Vortrag sollte durch Hinweise und rechnerische Nachprüfung einen Beitrag zur Frage der Kupfereinsparung auf dem Gebiet des Freileitungs-Armaturenbaues und verwandter Gebiete geben und so zur Nachprüfung anregen und andererseits die Grenzen für die Kupfereinsparung aufzeigen.

Versuche mit einem neuartigen Distanzrelais auf elektronischer Grundlage

Ing. *G. Hertel*, Lengenfeld (Vogtl.)

der modernen Technik werden in ständig wachsendem Maße elektronische für Aufgaben aller Art angewendet. Fast immer ergeben sich dabei im zu den vorher üblichen Verfahren Verbesserungen der technischen Daten Geräte. Viele anstehende Probleme konnten überhaupt nur elektronischen Geräten untersucht und gelöst werden. Es liegt daher nahe, ob sich nicht auch bei Distanzrelais der Mittel- und Hochspannungs- Verwendung elektronischer Bauelemente ähnliche Vorteile ergeben soll deswegen ein Überblick gegeben werden über Ergebnisse von Entwicklungsarbeiten an einem elektronischen Distanzrelais, die auf Anregung von von ihm und dem Verfasser durchgeführt wurden. Im 1. Teil wird wie sich die Bauelemente eines Distanzrelais elektronisch gestalten welche Anforderungen sie zu erfüllen vermögen. Bei der Vielzahl der die die Elektronik bietet, kann dabei natürlich nur eine Auswahl Entwicklungsbeispielen behandelt werden. Die Gesamtfunktion eines an- Versuchsmusters wird im 2. Teil an Hand seines Gesamtschaltbildes außerdem werden die Ergebnisse der ersten Erprobung bekannt- Der 3. Teil schließlich soll als Schlußbetrachtung einen Ausblick auf möglichen Weiterentwicklungen geben, die sich auf Grund der bisherigen Ver- erkennen lassen.

1. Teil

Die Bedingungen, die ein Distanzrelais erfüllen soll und die der Entwicklung zugrunde zu legen waren, wurden von einem speziellen Arbeitskreis der KdT festgelegt. Sie entsprachen etwa den Daten der bis dahin bekannten Relais. Über die Erfüllung dieser Daten hinaus hatten wir uns noch folgende Entwicklungsziele gestellt:

1. Weitestmögliche Grundzeitverkürzung,
2. Festigkeit des Relais gegen Pendelungen und Lichtbogenausweitung,
3. Senkung der Herstellungskosten und des Materialbedarfs
4. Verminderung des Raumbedarfs
   (Das Relais soll ein eingehäusiges, auf die Schalttafel montierbares Gerät von kleiner Grundfläche sein, so daß besondere Relaiswarten künftig entfallen können),
5. Senkung des Meßleistungsbedarfs, damit auch für die Schutzeinrichtungen Stabwandler geringster Leistung verwendet werden können.

6. Vereinfachung von Re[illegible] ausschließliche Verwendung handelsüblicher, genormter, austauschbarer Teile.
(Die Schaltung muß so gestaltet werden, daß bei Röhrenwechsel keine Nacheichung notwendig ist. Die Genauigkeit des Relais darf auch bei sehr großen Herstellungstoleranzen oder starker Alterung der Röhren nicht geringer werden.)
7. Röhrenausfall darf keinen Totalversager hervorrufen können; Funktionsstufen, bei denen dies möglich sein könnte, sind so zu schalten, daß sie bei hohen Sicherheitsansprüchen doppelt bestückt und daher bei Röhrenausfall unverändert weiter arbeiten können,
8. es muß eine Prüfschaltung vorhanden sein, mit der auch ungeübtes Personal schadhafte Röhren ermitteln kann.

Es werden im folgenden einige Ausführungen der Relaisbausteine besprochen, die unter Berücksichtigung dieser Bedingungen entwickelt wurden.

Die Anregungsschaltung

Es seien zunächst Schaltungen für Überstromanregung besprochen. Bei den ersten Versuchsmustern wurden noch elektromechanische Überstrom-Anregerelais verwendet. Von ihnen wurde jedoch abgegangen, weil sich bei ihnen häufig Kontaktprellungen ergaben, die zu einer großen Zeitstreuung und zu Fehlmessungen führten. Bei einer elektronischen Anregung ist dieser Nachteil nicht vorhanden, es wird auf jeden Fall — rein funktionsmäßig betrachtet — die Eigenzeit des Anregerelais eingespart. Die aus diesen Gründen entwickelten elektronischen Überstrom-Anregeschaltungen zeigt Bild 1. Am Stromwiderstand R wird eine stromproportionale Spannung abgegriffen, die über einen kleinen Zwischenwandler hochtransformiert wird. Der Wandler ist als Sättigungswandler ausgeführt, er ist etwa bei $3 \cdots 4\ I_n$ gesättigt, am Widerstand R_v kann die Ansprechstromstärke eingeregelt werden. Die Sekundärspannung wird nun gleichgerichtet. Es muß Vollweggleichrichtung angewendet werden, weil sonst das Ansprechen eine Halbwelle zu spät erfolgen könnte. Als Gleichrichter sind später Germanium-Gleichrichter vorgesehen.

Die so erhaltene ungeglättete Gleichspannung wird einer Glimmlampe zugeführt. Wird deren Zündspannung überschritten, so wird sie stromführend. Der Strom kann direkt oder über eine Röhre ein Relais steuern.

Betrachtet man das Verhalten der Schaltung an Hand ihres Diagramms (Bild 1), so ist ersichtlich, daß ein Halteverhältnis von praktisch 1 vorliegt, weil die Glimmlampe bei jedem Nulldurchgang erlischt und gesperrt wird. Bleibt die nächste Halbwelle auch nur eine Kleinigkeit unter der Zündspannung, so ergibt sich keine neue Zündung. Weiter erkennt man, daß hier eigentlich eine Scheitelwertmessung vorliegt. Der hierdurch bei stark oberwellenhaltigen Meßströmen mögliche Meßfehler bleibt allerdings durch das Zusammenwirken verschiedener Umstände in zulässigen Grenzen. Unangenehm ist bei dieser Schaltung lediglich, daß obwohl das Halteverhältnis an sich sehr gut, doch kaum veränderlich ist, zum anderen ist nachteilig, daß in der Schaltung als Normalwert die Zündspannung verwendet wird. Messungen an einer größeren Anzahl von Glimmröhren gleichen Typs haben ergeben, daß die Zündspannung viel stärker streut (etwa 15 %) als die Brennspannung (etwa 2,5 · · · 3 %). Außerdem aber ist die Zündspannung viel stärker temperaturabhängig als die Brennspannung.

[illegible] Schwierigkeiten verschwinden, wenn man die Röhre über [illegible] dauernd gezündet erhält — der Zündstrom beträgt nur wenige [illegible] die Brennspannung als Vergleichswert verwendet (s. Bild 1).

[illegible] verbesserten Schaltung ergeben sich noch geringere Fehler durch Verstärkung, und auch das Hüllenverhältnis läßt sich durch Bemessung, [illegible] und auch noch über die Konstruktion des nachgeschalteten [illegible] Grenzen verändern.

[illegible] Möglichkeiten für die Schaltung einer elektronischen Überstromauslösung bestehen beispielsweise vorhanden in der Anwendung von Kippschaltungen.

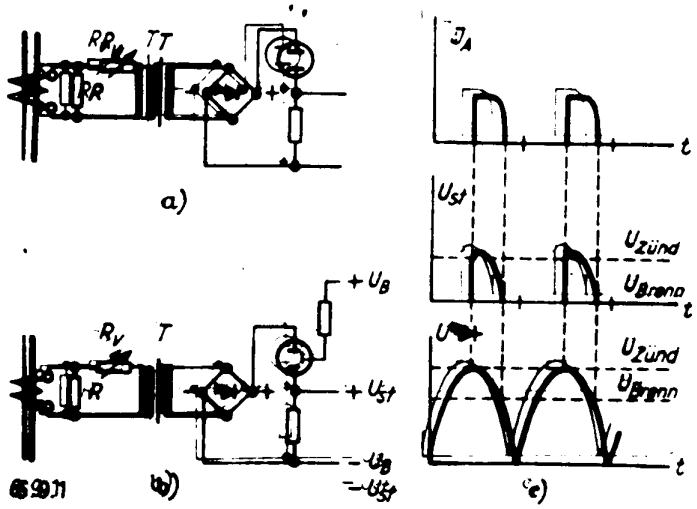


Bild 1. Elektronisches Distanzrelais, Stromanregung

[illegible] bei der Transistorschaltung. Ihre ausführliche Besprechung würde den [illegible] dieser Übersicht überschreiten. Der Aufbau einer Unterimpedanzanregung [illegible] im Rahmen der Impedanzmeßschaltung mit besprochen, da sich beide Anordnungen natürlich sehr ähneln.

Die Auswahlschaltung ist in bekannter Weise mit Hilfsrelais aufgebaut, die gleichzeitig zur Fehleranzeige dienen. Auf sie wird im zweiten und dritten Teil [illegible] eingegangen.

Das Impedanzmeßglied

Bei seinem Entwurf mußte davon ausgegangen werden, daß elektronische Geräte normalerweise spannungsgesteuert sind. Für die nachgeschaltete Apparatur muß also die Impedanz als Spannung erscheinen. Auch diese Aufgabe ließe sich gegebenenfalls elektronisch lösen. Der Aufwand würde sogar in tragbaren Grenzen bleiben, wenn man die Division $U/I = Z$ logarithmisch löst und somit auf eine Subtraktion reduziert. Es ist mir persönlich aber keine Schaltung bekannt, die bei genügend geringem Aufwand [illegible] der Erfindeten wäre. Im [illegible] und auf die [illegible] werden. Für [illegible]

stellung bedeutend einfacher. Hier [illegible] bekanntlich statt einer fortlaufenden Impedanzmessung die einfache binäre Entscheidung, ob die vorliegende Impedanz größer oder kleiner als der eingestellte Kippwert ist. Man kann also schreiben

$$U \cdot J \quad Z. \tag{1}$$

Da die Impedanz als Spannung erscheinen soll, wird I ersetzt durch die stromproportionale Spannung

$$u = I \cdot R \approx I. \tag{2}$$

Aus (1) und (2) ergibt sich für den Sonderfall $Z = 1$

$$U = u \quad \text{bzw.} \quad U - u = 0. \tag{3}$$

Man kann also die gesamte Impedanzmessung auf eine Subtraktion der beiden Meßgrößen reduzieren, wenn man die nachfolgende Schaltung so aufbaut, daß praktisch nur zwei Zustände möglich sind und daß der Übergang von dem einen

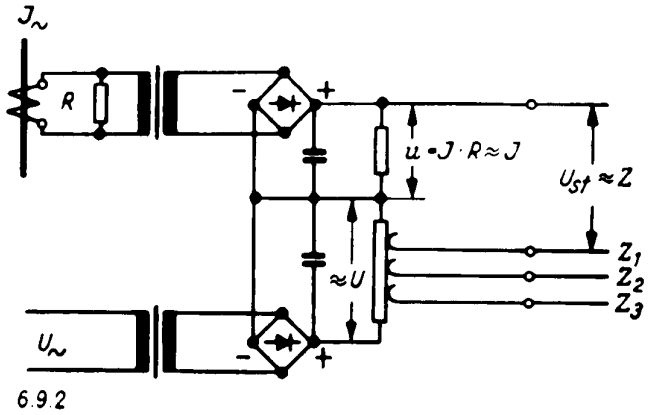


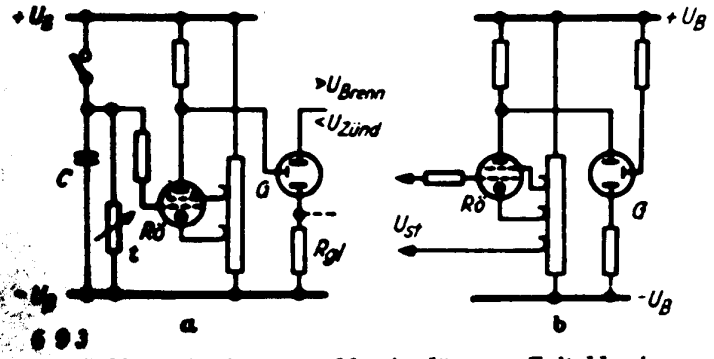
Bild 2. Impedanzmeßkreis

in den anderen Zustand bei Steuerspannung Null erfolgt. Die Schaltung des Meßkreises ist also sehr einfach. Wie Bild 2 zeigt, wird aus den bekannten Gründen mit gleichgerichteten Meßgrößen gearbeitet. Der Impedanzmeßbereich läßt sich allen praktisch vorkommenden Werten anpassen; die Impedanzwerte sind einfach an einem Spannungsteiler für eine der beiden Meßgrößen einstellbar. Der Einbau eines Mischimpedanzzusatzes ist in bekannter Weise ebenfalls möglich. Dieselbe Schaltung läßt sich natürlich auch für eine Unterimpedanzanregung anwenden.

Stufenauswahlschaltung, Auslösekreis und Zeitablaufglied

Diese Funktionsglieder sind grundsätzlich gleich aufgebaut und gehören zusammen. Zwei Schaltungsbeispiele zeigt Bild 3. Die Röhre *Rö* erhält als Gitter-vorspannung die Ausgangsspannung des beschriebenen Impedanzmeßkreises und die Ausgangsspannung des gleich noch zu besprechenden Zeitablaufgliedes. Sie ist so eingestellt, daß sie bei Null Volt gerade sperrt. An ihrer Anode angeschlossen ist entweder im Fall a) die Zündanode der Glimmlampe *G*, deren Hauptstrecke ein Potential zwischen Zünd- und Brennspannung hat, oder im Fall b) die Hauptentladungsstrecke einer u. U. über die Hilfsanode dauernd vorgezündete Glimm-

[illegible]. Solange dem Röhrengitter eine positive Vorspannung zugeführt wird, fließt [illegible]aber Anodenstrom; die Röhrenanode hat also praktisch Katodenpotential [illegible] Glimmlampe bleibt stromlos. Wird nun die Röhre durch eine negative [illegible]ung gesperrt, so steigt die Anodenspannung auf den Wert der Betriebs-[illegible]ung an, die Glimmlampe zündet und wird stromführend. Dieser Strom kann [illegible]weder direkt ein Relais erregen — in diesem Falle ist R_{gl} die Relaiswick-[illegible] oder es wird eine Verstärkerröhre gesteuert. Diese Schaltung a) wird man [illegible] Stufenauswahl- und Auslösekreise verwenden. Wie man sieht, kann die [illegible]gezündete Glimmlampe nur durch Abschalten der Spannung an der Haupt-[illegible]wieder gelöscht werden. Es wird hierauf noch einmal im zweiten und [illegible] Teil eingegangen. Die Schaltung b) eignet sich vor allem für Anregungs-[illegible], da die Stromführung der Röhre der steuernden Gitterspannung der [illegible] folgt. Man schaltet in diesem Falle die Vorröhre am besten als direkt



6 9 3

Bild 3. Stufenauswahl, Auslösung, Zeitablauf

[illegible] Transitron, d. i. eine Röhrenkippschaltung, die es gestattet, das Halte-[illegible], das ja bei Unterimpedanzanregung nicht zu klein sein soll, in weiten [illegible] zu verändern. Eine Einsparung der steuernden Vorröhre, die zumindest [illegible] Fall a) möglich erscheint, ist aus verschiedenen Gründen nicht zu empfehlen.

Wie bereits erläutert, kann dem eben besprochenen Funktionsglied auch die [illegible]spannung des Zeitablaufgliedes zugeführt werden (Bild 3, a). Die Einfachheit der Anordnung ist sofort zu erkennen, die nur aus einem Kondensator und einem Entladewiderstand besteht. Man kann natürlich auch erforderlichenfalls mit einer Aufladeschaltung arbeiten an Stelle der hier dargestellten Entladeschaltung. Der Kondensator C liegt über einem Schalter (Relaiskontakt) dauernd am Plus der Betätigungsspannung. Im Anregungsfall wird der Schalter geöffnet und die Entladung beginnt, Ist das Potential des Kondensators auf das Katodenpotential der Röhre abgesunken, so wird diese gesperrt und es werden die weiter oben besprochenen Vorgänge eingeleitet (Zündung der Glimmlampe usw.). Das Katodenpotential der Röhre liegt bei etwa $^1/_3$ der Gesamtspannung einmal zu dem Zweck, den Steuerzeitpunkt auf den noch steilen, fast linearen Teil der Entladekurve zu verlegen, wodurch sich die Genauigkeit erhöht. Andererseits ergibt sich eine Schaltung, die von den Absolutwerten der Betriebsspannung unabhängig ist, da die Laufzeit jener Zeit entspricht, die der Kondensator benötigt, um sich auf einen konstanten Bruchteil der Ausgangsspannung zu entladen.

Das Energierichtungsglied

Die spezielle Schaltung zeigt Bild 4. Die Meßgröße U wird dem Gitter 1 zugeführt, die Meßgröße I bzw. die ihr entsprechende Spannung $u = I \cdot R$ liegt an Gitter 2 der Röhre. Wie man sieht, kann ein Anodenstrom nur fließen, wenn $G1$ und $G2$ gleichzeitig positiv sind. In diesem Falle zieht das Relais an, zeigt dadurch die Sperrung an und verhindert zugleich die Auslösung. Bei Spannung 0 fließt bei Vorhandensein eines Stromes immer Anodenstrom, das Relais sperrt also. Wo es erforderlich erscheint, kann die Funktion allerdings auch gerade entgegengesetzt gewählt werden. Dem Bild ist weiter zu entnehmen, daß die Schaltung auf einfache Weise durch einen Phasendreher erweitert werden kann, der auf den Kurz-

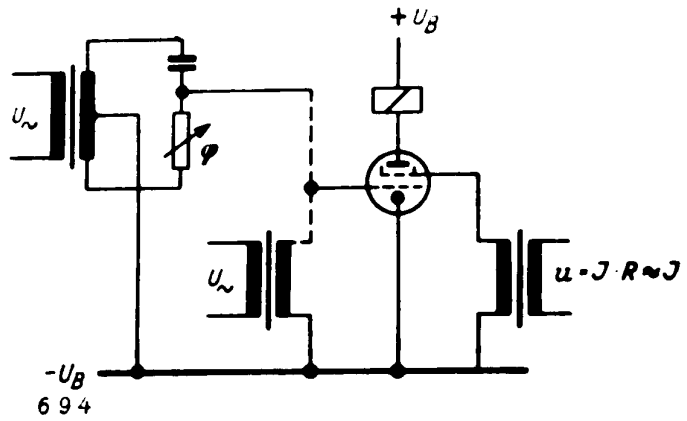


Bild 4. Energierichtungsbild

schlußwinkel der Leitung einzustellen ist, so daß stets eine optimale Richt- empfindlichkeit erzielt wird. Dabei ist die Einstellung nicht sonderlich kr- weil die Schaltung bei Winkeländerungen von $\pm 45°$ noch sicher arbeitet.

2. Teil

Nach der Besprechung der Funktionsglieder soll nun im 2. Teil ihr Zusam- wirken an Hand des Gesamtschaltbildes eines ausgeführten Versuchsmu- sprochen werden. Das Schaltbild ist der Übersichtlichkeit wegen gekürzt, im Sinne dieses Berichtes nicht funktionswichtigen Teile, wie Auswahlschal- und Stromversorgung, sind weggelassen (Bild 5). Gezeichnet ist ein Relais Überstromanregung, Impedanzeinstellung für Schnellzeit, erste und zweite Zeit- Laufzeiteinstellung für erste und zweite Zeitstufe sowie Reservezeit einschließlich Energierichtungsglied.

Das Relais arbeitet wie folgt:

Bei Fehlereintritt schaltet das Auswahlrelais AR die Meßgrößen an den Im- pedanzmeßkreis und an das Richtungsglied. Weiter wird die Betriebsspannung an- geschaltet und das Hilfsrelais H erregt. Dieses Relais schaltet den Zeitkonden- sator C von der Spannungsquelle ab und legt Stufenauswahlkreise und Auslöse- kreis an Spannung. Inzwischen hat das Richtungsglied seine Entscheidung bereits getroffen; je nach der gewählten Schaltung unterbindet es im Sperrungsfall entweder jedes weitere Arbeiten des Relais oder es verhindert nur die Auslösung. Es bleibt aber während der ganzen Dauer der Anregung in Funktion und folgt

eventuellen Änderung der Energierichtung bei Fehlerwechsel. Bei abflie-
Energierichtung erfolgt je nach vorliegender Impedanz entweder sofortige
über *Rö 1, 2* und *3* oder es spricht eines der Stufenauswahlglieder *Rö 4,*
7, 8, 9 an und schaltet den zugehörigen Entladewiderstand an den
tor *C*. Nach der Entladung des Kondensators erfolgt die Auslösung
3. Ist die Impedanz so groß, daß auch kein Stufenauswahlglied an-
folgt die Entladung von *C* über den immer eingeschalteten einstell-
widerstand und damit Auslösung in Reservezeit wieder über *Rö 1, 2, 3*.

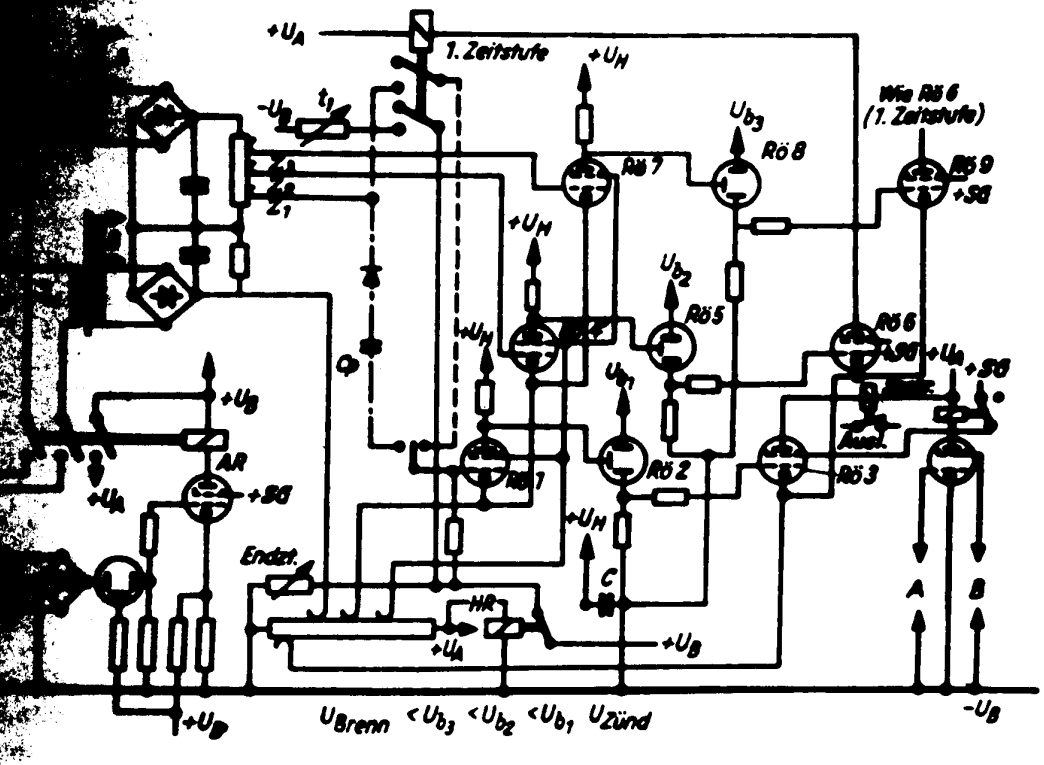


Bild 5. Gesamtschaltbild

bei genauerer Betrachtung der Arbeitsweise stellt man fest, daß das Relais
seine Entscheidung auf Grund des Meßwertes trifft, der im Augenblick der
Kontaktgabe des Hilfsrelais *HR* vorliegt, nämlich etwa eine Periode nach Fehler-
eintritt. Zu diesem Zeitpunkt erhalten der Auslösekreis und die Stufenauswahl-
glieder alle gleichzeitig den vorliegenden Impedanzwert zugeführt und sprechen
gegebenenfalls an. Durch Staffelung der Spannung $U_{b1} \cdots U_{b3}$ wird aber nur die
kleinste Impedanz wirksam. Diese Auswahl erfolgt trägheitslos elektronisch. Da
die einmal gezündeten Glimmlampen nur durch Abschalten der Spannung wieder
gelöscht werden können, ergibt sich hieraus, daß alle Impedanzerhöhungen, die
nachträglich beispielsweise durch Lichtbogenausweitung auftreten können und wo-
mit eine Laufzeiterhöhung bzw. Fehlentscheidung hervorgerufen würde, nicht mehr
wirksam werden. Ein solches Relais wie das hier beschriebene ist eigentlich eine

Parallelschaltung [illegible] Relais verschiedener Laufzeit. Dieser Umstand vermindert die Wahrscheinlichkeit von Totalversagern bedeutend.

Wie schon gesagt, ist das Relais absolut fest gegen Lichtbogenausweitung, da es auf Impedanzerhöhungen nicht eingeht. Betrachtet man nun den Schaltungsteil, der in Bild 5 strichliert bzw. strichpunktiert gezeichnet ist, so erkennt man, daß sich darüber hinaus das Relais so gestalten läßt, daß es nur durch Umlegen einer Umschaltlasche zwei verschiedenen Betriebsfällen Rechnung trägt. In dem einen Betriebsfall trennt sich das Relais im Augenblick der Entscheidung ganz vom Meßkreis ab (der Übersichtlichkeit wegen nur für den Auslösekreis, also die Schnellzeit, gezeichnet). Es bleibt also von allen weiteren Meßwertänderungen, wie sie vor allem durch Pendelungen auftreten können, unbeeinflußt, d. h. es ist pendelsicher. Im anderen Falle bleibt das Relais über einen Gleichrichter mit der Meßschaltung verbunden und kann so näherkommende Fehler erfassen. Wie gesagt, ist das Relais je nach seiner Verwendung auf das eine oder andere Verfahren

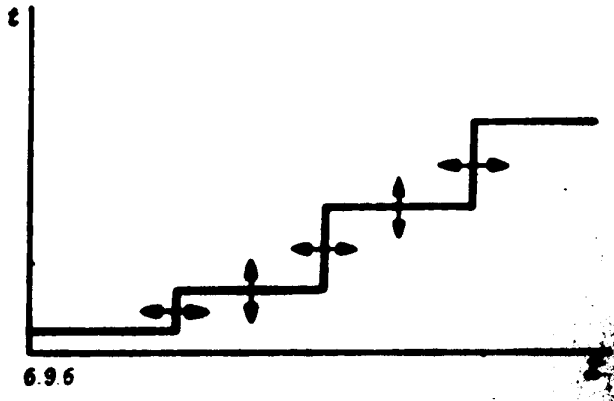


Bild 6. Kennlinie

leicht umschaltbar. Es ist aber auch noch eine Schaltung denkbar, die ist durch den Kondensator C_p angedeutet — die das Eingehen auf Fehler von dem Wert dZ/dt, also der Geschwindigkeit der Impedanzänderung abhängig macht. Ein solches Relais könnte auf die Umschaltung [illegible] Fehlerwechsel, also schnelle Änderungen, erfaßt, Pendelungen dagegen, langsame Änderungen, unberücksichtigt läßt.

Einige ausgeführte Musterrelais hatten etwa folgende Kennwerte:

(Bild 6) Schnellzeit 30 · · · 50 ms,
Richtungsempfindlichkeit 0,1 V,
Mindestspannung bei 5 · · · 100 A,
Eigenverbrauch Strompfad 0,15 Ω Phase bei 5 A = 3,75 VA,
Spannungspfad 4 VA bei Nennspannungen,
Zeitstreuung max. 0,03 s,
Impedanzstreuung max. 0,02 Ω;
Zeit: Jede Stufe ist einstellbar von 0,1 · · · 15 s,
Impedanz: Jede Stufe ist einstellbar von 0,6 · · · 10 Ω, Umschaltung auf andere Werte bis herunter zu 0,05 Ω ist ohne weiteres möglich.

Die Funktionsanzeige erfolgt bei dem beschriebenen Relais durch Fallklappen. Dabei ist zu beachten, daß das Relais statt der Laufzeit die Fehlerdistanz anzeigt; die Laufzeit ergibt sich nur mittelbar im Falle der Auslösung. Für die Störungsaufklärung erscheint diese Anzeige am sinnvollsten. Ein zeitanzeigendes Mittel kann natürlich hinzugefügt werden, falls man glaubt, daß man zum Überwachen der Relaisfunktion auf eine Laufzeitanzeige nicht verzichten kann.

3. Teil

Am Anfang des dritten Teiles, der ein Ausblick auf die mögliche Weiterentwicklung sein soll, sei noch einmal zusammenfassend festgestellt, daß das elektronische Distanzrelais außer einigen Hilfsrelais einfachster Art keine besonderen mechanischen Teile enthält. Durch den stark verringerten Raumbedarf in eingehäusiger Ausführung ist die Möglichkeit der Montage auf die Schalttafel gegeben. Schließlich ist von dem Relais u. a. Pendelfestigkeit, Unempfindlichkeit gegen Lichtbogenausweitung und Freiheit von Meßwerttäuschung zu erwarten. Darüber hinaus zeichnen sich für den erst in seinen Anfängen stehenden Zweig der Schutztechnik folgende Möglichkeiten ab:

1. Zur weiteren Verkürzung der Grundzeit z. B. sind kontaktlose Einrelaisschaltungen sehr geeignet. Mit diesen Schaltungen könnte man Schaltzeiten von 10 ··· 15 ms sicher erreichen, wobei der Wert von 10 ms einen Grenzwert darstellen dürfte, der physikalisch durch die periodische Struktur der Meßgrößen bedingt ist. Vor Anwendung solch kurzer Schaltzeiten müßte allerdings überhaupt erst einmal geklärt werden, ob es zweckmäßig ist, so schnell zu schalten. (Es wird gebeten, diese grundsätzliche Frage der Schutztechnik zu diskutieren.) Unabhängig davon aber bietet die Einrelaisschaltung auf alle Fälle einen höheren Sicherheitsgrad. Der Mehraufwand gegenüber Relais mit Auswahlschaltung ist bei elektronischer Ausführung geringer als dies auf den ersten Blick scheinen mag.

2. In mehreren Referaten der letzten Relaistagung in Berlin im November 1954 kam im Zusammenhang mit der Schnellwiedereinschaltung die Tendenz zum Ausdruck, grundsätzlich erst einmal einen Schnellwiedereinschaltzyklus durchzuführen, wobei dann bevorzugt die Übergreifschaltung angewendet wird. Auch für diese Aufgabe sind elektronische Geräte wegen ihrer Trägheitslosigkeit besonders geeignet.

3. Die bisherigen Versuche mit den beschriebenen Geräten lassen eine Distanzmessung auf 1 ··· 2 Spannfelder genau bei Freileitungen für möglich erscheinen. Unter Umständen läßt sich also auf diesem Wege durch das Relais gleichzeitig auch noch eine Störungsortung bewirken.

Abschließend wäre festzustellen, daß die Vorteile elektronischer Relais erst durch die Verwendung ungeheizter Röhren voll zur Geltung kommen, weil die Zuverlässigkeit dadurch weiter gesteigert wird. Es schien aber nicht zweckmäßig zu warten, bis diese Röhren zur Verfügung stehen, galt es doch zunächst einmal festzustellen, welche Möglichkeiten überhaupt durch das elektronische Distanzrelais gegeben sind. Diese Erkenntnisse kann aber nur eine lange Erprobung im praktischen Einsatz vermitteln. Es war nun das Ziel unserer Arbeit, möglichst schnell für diese Erprobung, die zur Zeit im Gange ist, [illegible] Anzahl einsatzfähiger Versuchsrelais zu schaffen. Auf [illegible] spezifisch elektronischen Schal[illegible] da ja wohl

ohne weiteres anzu[illegible] Bewahrung eines Relais mit bei-
spielsweise 10 Röhren auch Nachbildungen bewahren werden, bei denen durch
schaltungstechnische Verfeinerungen die Röhrenzahl auf 6 bis 8 vermindert werden
konnte.

Gerade für den Zweck der Erprobung scheint aber die beschriebene Konstruk-
tion besonders geeignet, kann sie doch wegen ihrer Anpassungsfähigkeit leicht
Teilen gebaut werden, die ursprünglich einem ganz anderen Zweck dienen sollten.
Die damit gewonnenen Erkenntnisse lassen sich selbstverständlich uneingeschränkt
auch auf ein Modell mit speziellen optimalen Teilen anwenden.

Ich hoffe, daß es mir gelungen ist, einen Überblick über diese Arbeiten zu
und daß ich zeigen konnte, daß auch in der Schutztechnik elektronische
u. U. Vorteile bringen können. Manches seit langem anstehende Problem
Schutztechnik läßt sich elektronisch relativ einfach lösen. Ich bin der
Meinung, daß sich die elektromechanische und die elektronische Bau-
der Relaistechnik gegenseitig anregen und ergänzen können. Deshalb
Schluß dieses Vortrags, der sich nur mit der gerätetechnischen Bau-
technik, also mit der eigentlichen Relaisapparatur befassen konnte,
Wunsch aussprechen, daß möglichst bald als Ergebnis einer
arbeit der Vertreter beider Baurichtungen in der Relaistechnik
gung nicht dieses oder jenes, sondern das Relais erhält.

3.9 Hochfrequenztrassierungsgerät

Dipl.-Ing. *K. Schneider*, Berlin

Im Zuge des Ausbaus unserer Energiewirtschaft ist es erforderlich, die in den neu errichteten bzw. noch zu bauenden Kraftwerken geschaffene Leistung abzutransportieren. Im Laufe der nächsten Jahre wird es erforderlich sein, eine größere Anzahl großer Übertragungsleitungen für 220 kV und 110 kV zu bauen. Ähnlich liegen die Verhältnisse auch in anderen Ländern, besonders in den Volksdemokratien und der Sowjetunion. Besonders in der Sowjetunion wird die mit Riesenschritten vorwärts entwickelte Energieerzeugung die Schaffung eines immer dichteren Hochspannungsübertragungsnetzes über weiteste Gebiete erfordern.

Häufig stößt nun die zügige Durchführung der Leitungstrassierung auf Schwierigkeiten, sei es, daß anhaltend unsichtiges Wetter ist, sei es, daß es sich um die Trassierung einer Leitung durch waldreiches Gebiet handelt. Für diesen Fall wurde auf Grund eines Verbesserungsvorschlages ein Hochfrequenztrassierungsgerät entwickelt. Über dieses Gerät und über seine ersten Versuche soll das vorliegende Referat berichten.

Über die theoretischen, hochfrequenztechnischen Zusammenhänge, wie sie für ein derartiges Trassierungsgerät gelten, hat Kollege Dr. *Neidhardt* bereits in der „Nachrichtentechnik" Jg. 3 (1953) S. 295 eingehend berichtet und dort bereits auch das von Koll. *Schneider* und *Merkel* vorgeschlagene Trassierungsgerät kurz behandelt. Die theoretische Seite des Hochfrequenztrassierungsgerätes soll deshalb hier nicht näher behandelt werden.

Es sei angenommen, daß in einer gebirgigen oder waldreichen Gegend eine 110- oder 220-kV-Leitung gebaut werden soll. Die Trasse ist erkundet und in einer Übersichtskarte 1 : 25000 festgelegt worden. Nunmehr wird beispielsweise die Aufgabe gestellt, eine Abspannstrecke von etwa 5 km im Gelände abzustecken und zu verpflocken, wobei die Abspannpunkte oder auch Winkelpunkte durch Hindernisse gegenseitig nicht sichtbar sind.

Nach dem allgemein üblichen Verfahren ist es so, daß die Richtung graphisch aus der Karte entnommen wird und das Fernrohr des Theodoliten in diese Richtungen gestellt wird. Durch rückwärtige Verlängerungen arbeitet man sich durch das unübersichtliche Gelände hindurch, bis man in die Nähe des gewünschten Endpunktes kommt. In den seltensten Fällen wird es wohl gelingen, den Zielpunkt genau zu erreichen. Deshalb werden aber oft unnötige Sichtschneisen durch die Forste geschlagen, was ein großer volkswirtschaftlicher Verlust ist.

Abhilfe soll nun das inzwischen entwickelte Hochfrequenztrassierungsgerät schaffen. Bei dem Gerät handelt es sich um eine sogenannte Leitstrahlanlage. Bei derartigen Einrichtungen gibt es grundsätzlich zwei Verfahren. Entweder verwendet

man die Amplitude einer Feldstärke und die Phase. Das vorliegende Gerät arbeitet nach dem Verfahren des Amplitudenvergleichs. Der Aufbau derartiger Einrichtungen ist einfacher als der der Geräte mit Phasenvergleich. Der Leitstrahl bei amplitudenmäßig definierter Anlage ist als der geometrische Ort für die Gleichheit zweier Feldstärkeamplituden definiert. Dazu ist erforderlich, daß zwei Antennen benutzt werden.

Bild 1 zeigt die Aussendung zweier Strahlungsdiagramme durch die Antennen *A* und *B*, die voneinander abwechselnd getastet werden. Im Gebiet des Leitstrahls

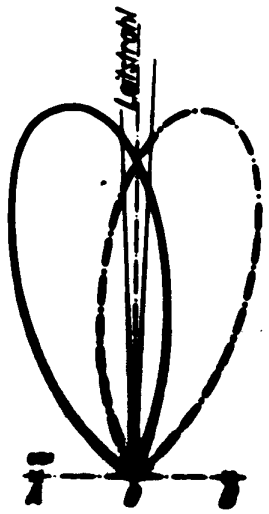


Bild 1. Feldstärkevergleich zur Leitstrahlerzeugung

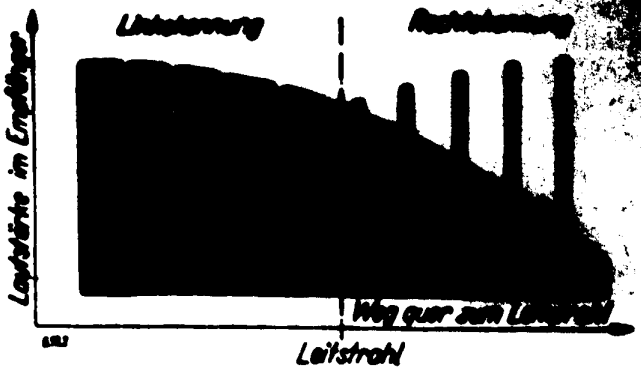


Bild 2. Zeichenbildung in der Umgebung des Leitstrahles

sind die Feldstärkeamplituden gleich groß. Tastet man nun die eine Antenne innerhalb jeder Sekunde $^4/_5$ s lang und die andere Antenne $^1/_5$ s lang, so hört der Leitstrahlempfänger im Gebiet des einen Strahlungsdiagramms Striche, im Gebiet des anderen Punkte. Auf der Symmetrieachse beider Strahlungsdiagramme ergänzen sich dann die Punkte und Striche zu einem Dauerton. Der geometrische Ort, wo dieses der Fall ist, ist eine Gerade. Diese Geradlinigkeit wird durch keine Hindernisse, wie Berge, Häuser, Wälder, Nebel, beeinträchtigt.

Mit Hilfe dieses Leitstrahles kann man also im Gelände eine geradlinige Strecke festlegen.

Bild 2 zeigt die Zeichenbildung in der Umgebung des Leitstrahles. Wir sehen auf der linken Seite des Leitstrahls die Strichgebung und rechts die Punktgebung, wobei die Lautstärke im Empfänger durch die Amplitude der Striche und Punkte in Abhängigkeit von der Entfernung des Meßpunktes vom Leitstrahl angegeben ist.

Beschreibung des Hochfrequenztrassierungsgerätes

Im allgemeinen ist festzustellen, daß sich Hochfrequenzwellen nicht für das geschilderte Verfahren eignen. Die Praxis hat jedoch bereits erwiesen, daß Wellenlängen zwischen 8 und 12 m hiervon eine Ausnahme machen. Das von *Neidhardt* entwickelte Gerät arbeitet mit einer Wellenlänge von 10 m.

Das Trassierungsgerät besteht zunächst aus folgenden Einzelteilen:

1 UKW-Sender mit 20-Watt-Sendung,
1 Leitstrahlgerät,
1 Umformer zum 20-Watt-UKW-Sender,
2 Leitstrahl-Antennen,
1 Leitstrahl-Empfänger,
2 Wechselsprechgeräte mit den jeweils zugehörigen Kabeln und Armaturen.

Die Antennen werden in einer Entfernung von 50 m voneinander rechts und links vom Ausgangspunkt aufgestellt, dabei ist es nicht notwendig, daß die Antennen in gleicher Höhe stehen, wie das ja auch in der Praxis nicht immer zu erreichen ist. Die Stabantennen stehen je auf einem 8 m hohen Steckmast. Diese Antennen werden, wie schon angegeben, abwechselnd getastet. Dadurch entsteht im Raum ein keulenförmig vielblättriges Feldstärkendiagramm. An einzelnen Stellen des gesamten Diagramms unterstützen sich beide Antennenstrahlungen, an anderen kompensieren sie sich zu Null auf Grund der sich ergebenden Interferenz. Es wird noch bemerkt, daß die Antennenbasis, also die Verbindung zwischen den beiden Antennen, senkrecht zur Trasse liegen muß. Der Leitstrahl, der zur Trassierung benutzt wird, ist innerhalb eines Winkels von $\pm 2{,}5°$ durch einen im Gerät eingebauten Phasenschieber bewegbar, um Ungenauigkeiten ausgleichen zu können.

Bild 3 zeigt eine Ansicht der Sendeanlage des Gerätes. Auf dem UKW-Sender steht das Leitstrahlgerät mit dem Steuergriff für die Leitstrahlfestlegung und der dazugehörigen Steuerkurve für die Einstellung. Rechts vom Leitstrahl gehen zwei Antennenkabelführungen und ein Kabel zum Sender ab. Links von diesem Gerät steht der Umformer für die erforderlichen Spannungen, der von einer 12-V-Batterie gespeist wird. Im Hintergrund, hinter den Geräten, steht ein UKW-Wechselsprechgerät mit Peitschenantennen. Bild 4 zeigt die Ansicht einer der Antennen. Zur Festlegung der Trasse im Gelände geht man nun auf der geraden Strecke, auf der der Dauerton zu hören ist, vorwärts und markiert dabei die Strecke. Es kann auch der Fall vorliegen, daß man bei der Trassierung zu einem Punkt gelangen will, der zunächst nicht zugänglich ist, dann weist man den Leitstrahl auf einen dazwischen liegenden Punkt der gewünschten Trasse ein und kann dann durch Umgehung des Hindernisses, z. B. eines Sees, den gewünschten Endpunkt feststellen.

Die Signale der Sendeanlage werden im Kopfhörer empfangen. Für den erfahrenen Hochfrequenz-Ingenieur sind diese Signale leicht zu unterscheiden. Der auf diesem Fachgebiet weniger Erfahrene bedarf einer gewissen Übung, um im kritischen Ge-

biet des Leitstrahles [illegible]. Es wurde deshalb zusätzlich noch ein An[illegible] instrument entwickelt, und zwar ein Mikro-Amperemeter, das die Signal[illegible] Zeigerimpulse angibt. Das Instrument hat den Nullpunkt in der Mitte. We[illegible] das Gerät, mit dem Sender im Rücken, vor sich betrachtet, so bedeuten [illegible] ausschläge Striche, Rechtsausschläge Punkte. Auf dem Leitstrahl selbst bl[illegible] Zeiger in Nullstellung stehen.

Den Kollegen, die bei den Abnahmeversuchen die Leitstrahlerm[illegible] machten, war dieses Gerät eine wertvolle Unterstützung zur Erkennung d[illegible] zeitig im Kopfhörer aufgenommenen Signale.

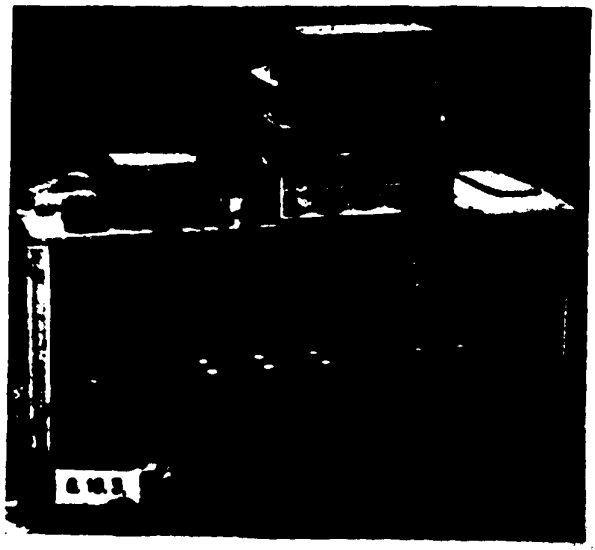


Bild 3. Ansicht der Sendeanlage des Ge[illegible]

Um dem Trassierungsingenieur das zuverlässige [illegible] wurde zusätzlich zum Trassierungsgerät noch ein Leh[illegible] Gerät wurde am Schluß des Vortrages praktisch vorgeführt.

Es gibt noch eine andere Möglichkeit zur Einweisung d[illegible] gewünschte Richtung, z. B. für den Fall, daß das Wech[illegible] Verfügung steht.

Man läßt am Sender den Leitstrahl von 5° zu 5° durchla[illegible] etwa 30″ stehen und läßt über den Telefoniekanal des Senders [illegible] die jeweilige Leitstrahleinstellung bekanntgeben. Der Leitstrah[illegible] zu diesem Zwecke Kopfhöreranschluß. In wenigen Minuten hat [illegible] Leitstrahleinstellung erkannt. Man muß nun dem die Sendea[illegible] die richtige Einstellung mitteilen; dann kann die Trassierung durch[illegible]

Ende vergangenen Jahres wurde das Trassierungsgerät unter besc[illegible] gen Geländebedingungen ausprobiert. Hierzu wurde eine bereits tra[illegible] einer neuen 220-kV-Leitung in der Nähe von Berlin benutzt. Der Pu[illegible] stellung des Senders sei A. Zunächst wurde ein Punkt B auf der bereits [illegible] Trasse gesucht, und der Leitstrahl auf diesen Punkt mittels des G[illegible] gerätes eingewiesen. Das Gegensprechgerät arbeitet mit Dezimeterwelle[illegible]

[illegible] kann das Gerät am Boden aufgestellt werden. In waldreichen Gebieten [illegible] es sich jedoch, das Gerät in einigen Metern Höhe anzubringen. Dieses [illegible] leicht dadurch, daß das Gerät mittels einer Wurfleine, die über einen [illegible] geworfen wurde, hochgezogen wird. Mikrophon und Kopfhörer [illegible] verlängerten Anschlußleitungen versehen.

[illegible] Verwendung des Dezimeter-Gerätes bedeutet noch eine gewisse [illegible]. Dadurch wurde Koll. Dr. *Neidhardt* zu einer Verbesserung der [illegible] angeregt, die die zusätzliche Verwendung des Gegensprechgerätes

[illegible] längeren Strecke der Trasse wurden bei dem erwähnten ersten Versuch [illegible] abgesteckt, innerhalb deren der Leitstrahl liegen mußte.

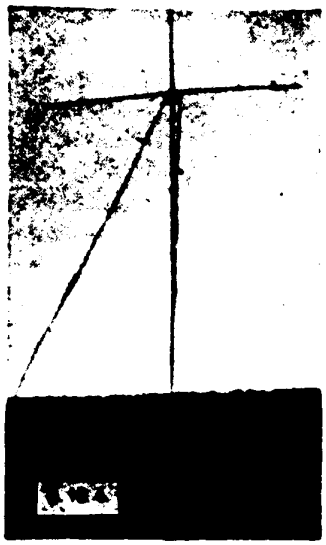


Bild 4. Ansicht einer Antenne des Leitstrahlgerätes

Bei Verwendung von Kopfhörer und Anzeigegerät war diese Strecke etwa 3 m, der Leitstrahl selbst lag praktisch in der Mitte dieser Strecke, was eine Visierung der ebenfalls gekennzeichneten Leitstrahlpunkte ergab.

Ein zweiter Versuch wurde mit einem von einem Kollegen am Rande einer Waldung ohne Wissen der anderen Versuchsteilnehmer ermittelten Trassenpflock gemacht. Die Einmessung des Leitstrahles und damit Festlegung des Trassenpflocks mittels Kopfhörer und Anzeigegerät ergab zwei Grenzpunkte in einem Abstand von 2,5 m, genau in der Mitte dieser beiden Grenzpunkte stand der Pflock.

Bei einem dritten Versuch wurde die Leitungstrasse auf der anderen Seite des Leitstrahlsenders kontrolliert. Es wurde angenommen, daß der gesuchte Endpunkt dieser Strecke zunächst nicht zugänglich sei. Die Sendeanlage brauchte zu diesem Zweck nicht umgestellt zu werden. Es ergibt sich bekanntlich um die Antennen ein vielblättriges Feldstärkendiagramm mit Nebenleitstrahlen, die ebenfalls zum Trassieren verwendet werden können. Aus der Kennung, die man im Kopfhörer hört bzw. im Anzeigegerät sieht, erkennt man wieder die Stellung des Standortes zur Trasse. Von einem verhältnismäßig nah vom Sender entfernt liegenden Punkt,

an dem ein Trassenpflock [illegible] wurde, wurde dieser Leitstrahl auf diesen Punkt eingewiesen. Wir begaben uns dann in die Gegend des vermuteten Endpunktes dieser Strecke, wobei betont werden muß, daß der Trassierungs-Ingenieur, der seinerzeit bei der Trassierung der Strecke mitbeteiligt war, nicht zugegen war. Es war inzwischen finster geworden, trotzdem fanden wir mit verhältnismäßig geringen Schwierigkeiten den gesuchten Endpunkt. Eine Korrektur des Leitstrahles auf den neuen Punkt war nicht nötig. Im Waldgelände an dieser Stelle wurde dann am nächsten Tag ein kleiner Teil der Strecke nachgemessen. Die Abweichungen von der festgelegten Trasse schwankten zwischen 1 bis 5 m.

Es wurde dann noch eine Kontrollmessung in 10 km Entfernung vom Sender gemacht. Auch hier konnten noch die Signale hinreichend einwandfrei empfangen werden.

Bei den Kontrollmessungen zeigt es sich, daß das erwähnte Mikroamperemeter noch etwas empfindlicher in seiner Anzeige sein sollte und daß nach Möglichkeit an Stelle der Impulsanzeige eine Standanzeige treten sollte.

Unsere Ansicht ist, daß das Gerät bei Trassierung langer und unübersichtlicher Strecken, wie sie besonders auch in den Gebieten der Volksdemokratien und der Sowjetunion vielfach auftreten, eine gute und erfolgreiche Verwendung finden kann. Es wird empfehlenswert sein, für den endgültigen Gebrauch das Gerät mit der Sendeanlage fest in einen zweirädrigen Autoanhänger komplett einzubauen. Bei unseren Versuchen, bei denen die Einzelteile der Sendeanlage erst montiert werden mußten, wurde einschließlich Aufstellung der Antenne eine knappe Stunde benötigt, eine Zeit, die sich noch verkürzen ließe.

5.10 Normung, Typung und Standardisierung für das Gebiet der Energiewirtschaft

Ing. *G. Kuschewitz*, Berlin

1. Allgemeines über Normung und Typung

Die große Bedeutung einer Normung, Typung und Standardisierung hat sich im Laufe der letzten Jahrzehnte in allen Industrieerzeugnisse herstellenden Ländern in zunehmendem Maße gezeigt. Nach Normen, Typen und Standards hergestellte Erzeugnisse zeigen eine gleichbleibende, hohe Qualität, die Austauschbarkeit von einzelnen Teilen wird gewährleistet, und die Erzeugnisse können zu besonders günstigen Preisen hergestellt werden.

Eine Normausführung eröffnet die Möglichkeit, große Stückzahlen aufzulegen, eine Serien- und Massenproduktion einzuführen, die Fertigung zu verbilligen und Spezialmaschinen bzw. Fließbandfertigung einzurichten.

All diese Maßnahmen laufen darauf hinaus, die Produktionskosten zu senken, die Arbeitsproduktivität zu steigern und damit eine Herabsetzung der Preise für das Erzeugnis zu erreichen. Die Montage und Bedienung von genormten Einrichtungen ist erleichtert. Es können Montage- und Erprobungszeiten terminlich besser festgelegt und eingehalten werden. Das Personal kann besser auf der Grundlage einheitlicher Betriebs- und Bedienungsanweisungen geschult werden.

Während wir früher in der kapitalistischen Wirtschaft eine große Anzahl von unabhängig voneinander, meist in Konkurrenz gegeneinander arbeitenden Fertigungsbetrieben hatten, befinden sich heute die wesentlichen Produktionsstätten in Volkseigentum. Es ist demnach heute bei der vorhandenen zentralen Lenkung in unserer sozialistischen Wirtschaft wesentlich leichter als früher, eine einheitliche Produktion, die sich auf Normen, Typen und Standards aufbaut, einzurichten. Wir müssen bestrebt sein, diese Vorteile unserer sozialistischen Wirtschaft gegenüber der kapitalistischen Wirtschaft durch möglichst schnelle und umfangreiche Aufstellung und Anwendung von Normen, Typen und Standardausführungen auszunutzen, um damit zu besseren und billigeren Erzeugnissen zu gelangen. Wir müssen dies auch aus dem Grunde tun, weil wir unsere Erzeugnisse ausführen wollen, um hierdurch unsere Lebenshaltung verbessern zu können.

Auch die von unserer Volkskammer für den zweiten Fünfjahrplan vorbereiteten Entschlüsse, die eine Verbesserung der Qualität der Erzeugnisse, die Mechanisierung und Automatisierung der Industrie fordern, um die Arbeit der Werktätigen zu erleichtern, lassen sich nur über eine weitgehende Normung, Typung und Standardisierung erreichen.

2. Beispiele der Anwendung von Normen und Typen im Maschinenbau

Die Anwendung der DIN- und VDE-Normen ist heute für den ganzen Maschinenbau und die Elektrotechnik selbstverständlich. Es wird niemandem mehr einfallen,

beispielsweise für [illegible] Querschnitt auszuführen, sondern man wird hier [illegible] Schraube wählen.

Während die Normung von Maschinenelementen und Einzelteilen des Maschinenbaues und der Elektrotechnik schon weit vorgeschritten ist, sind wir in der Normung, Typung und Standardisierung von zahlreichen Ausrüstungen und Anlagen noch im Rückstand.

Hier nur ein Beispiel: Aus der Kraftfahrzeugindustrie der Vorkriegs- und Kriegszeit ist es uns bekannt, daß wir damals in Deutschland eine sehr große Anzahl von Kraftfahrzeugtypen hatten. Die sich hieraus ergebenden außerordentlichen Schwierigkeiten in der Ersatzteilbeschaffung und beim Austausch von Teilen hat sich stark sehr nachteilhaft ausgewirkt. Man konnte feststellen, daß andere Länder, [illegible] spielsweise die Sowjetunion und Amerika, nur verhältnismäßig wenige Typen besaßen, bei denen eine weitgehende Austauschbarkeit der Teile gewährleistet [illegible] Man hatte die Möglichkeit, unter Verwendung von Teilen ausgefallener Fahrzeuge wieder gebrauchsfähige Fahrzeuge herzustellen. Ende des vergangenen [illegible] wurden in den USA 80 % der gesamten Kraftfahrzeugproduktion in nur 20 [illegible] hergestellt, während in den übrigen europäischen Ländern bei nur 20 % der [illegible] tion über 100 Typen gefertigt wurden.

Besonders stark ist bekanntlich die Typenbeschränkung in der Sowjetunion. Man sieht, daß Länder, in denen die Technik und die Fertigung weit vorgeschritten ist, in denen große Wirtschaftsräume zusammengefaßt sind und deren [illegible] neu aufgebaut wurden, zu einer starken Einschränkung von Typen und [illegible] von genormten Einzelteilen gekommen sind.

Das vorerwähnte Beispiel aus der Kraftfahrzeugproduktion läßt sich [illegible] weniger auch auf alle übrigen Produktionen sinngemäß anwenden.

Auch die in der Kriegszeit hergestellte Einheitslokomotive wäre in [illegible] sammenhang zu erwähnen.

Es ist sicher, daß im allgemeinen eine Normung und Typung große [illegible] wenn es sich um Massen- oder oft ausgeführte Teile handelt.

Die Erfahrungen haben jedoch gezeigt, daß auch bei Ausrüstungsteilen, die in geringer Auflage produziert werden, eine Normung [illegible] es durch schnellste Ausführung von Reparaturen und damit hohe [illegible] stundenzahlen, sei es durch den Fortfall langfristiger Projektierungs- [illegible] tions- und Fertigungsvorbereitungen, vorteilhaft ist.

8. Bestehende Einwände gegen die Anwendung von Normen und [illegible]

Vielfach wird von Kollegen, die noch nicht die Vorteile einer Normung und Standardisierung erkannt haben, darauf hingewiesen, daß man [illegible] lichungen der Bauteile von Energieanlagen kaum oder nur in sehr beschränktem Umfang durchführen kann, weil es beispielsweise keinen einheitlichen [illegible] kein einheitliches Wasser und keine einheitliche Verteilung der erzeugten [illegible] gibt. Es wird ferner darauf hingewiesen, daß die Anforderungen, wie sie beispielsweise von chemischen Industrien, Heizanlagen usw. an Kraftwerke [illegible] werden, so unterschiedlich sind, daß eine Vereinheitlichung nicht in Frage [illegible] So wird auch gegen eine Vereinheitlichung von Bauteilen und Baueinheiten [illegible] Kraftwerkstypen geltend gemacht, daß eine bessere Lösung nur bei Auslegung [illegible] Anlagen unter Anpassung an die örtlichen Verhältnisse möglich ist. Zweck[illegible]

wird hier der Fehler gemacht, daß man glaubt, es sollte durch Typung und Normung auf dem Gebiet, wie es der moderne Kraftwerksbau ist, alles 100 %ig festgelegt werden. Dies wäre nicht richtig. Man wird aber einen sehr hohen Prozentsatz von Einzelteilen, Bauteilen und Baueinheiten erforderlichenfalls mit verschiedenen Varianten festlegen können, die jeweilig zur Anwendung kommen, so daß bereits durch die Anwendung dieser Teile eine ganz erhebliche Einsparung an Arbeit in Konstruktion und Fertigung entsteht.

Es ist zwar richtig, daß wir in der DDR keinen einheitlichen Brennstoff haben. Die Verhältnisse liegen jedoch so, daß wir in der nächsten Zeit mit Heizwerten der Rohbraunkohle im östlichen Gebiet von etwa 1700 kcal/kg und in den westlichen Gebieten von 1800 kcal/kg für die Kraftwerke rechnen können.

Selbstverständlich wird man für sehr unterschiedliche Brennstoffe auch verschiedene Kesseltypen mit den für die Brennstoffe geeigneten Feuerungen festlegen müssen.

Es ist auch damit zu rechnen, daß man für besondere Exportzwecke noch die eine oder andere Type neu entwickeln muß. Man wird jedoch bei Aufstellung und Festlegung einer gewissen Typenauswahl erhebliche Einsparungen an Konstruktions- und Fertigungszeit erreichen.

Es muß in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, daß oft Brennstoffanalysen, auf Grund deren die Kesselauslegung erfolgte, während der Betriebszeit Änderungen unterworfen sind, die durch andere Brennstofflieferanten oder Zusammensetzung der abgebauten Flöze entstanden. Dadurch entstehen oft Abweichungen, so daß die Berechnung auf der Grundlage der ursprünglichen Analysen nicht mehr zutrifft. Hierauf wird offensichtlich nicht genügend Rücksicht genommen. Aus den vorgenannten Gründen ist ein breites Brennstoffband, das auch eine Typeneinschränkung begünstigt, auch vom betrieblichen Standpunkt durchaus erwünscht.

Ein anderes Beispiel: Die Einwände, daß eine typenmäßige Festlegung von Wasseraufbereitungsanlagen, Speichern und Entgasungsanlagen nicht möglich sei, weil die Anlagen den jeweiligen betrieblichen bzw. Wasserverhältnissen angepaßt werden müssen, haben so lange Berechtigung, als unter Zugrundelegung der Wasserbeschaffenheit Filtergeschwindigkeiten, Vorratszahlen usw. der einzelnen Apparate nach den jeweiligen Anforderungen berechnet und hiernach die Abmessungen der Apparate festgelegt werden.

Geht man hier den umgekehrten Weg, indem man derartige Apparaturen nur als Behälter bzw. als nach einer bestimmten Normenreihe festzulegende Gefäße betrachtet, für die man für die verschiedenen Wasserbeschaffenheiten die Leistungen festlegt, dann ergibt sich auch auf diesem Gebiet durchaus die Möglichkeit einer Festlegung von Typen. Dieser Standpunkt ist um so mehr berechtigt, als die in den Berechnungen erscheinenden Werte im Laufe der Betriebszeit stark streuen und es in der Regel auch nicht darauf ankommt, ob ein Filter eine etwas längere oder kürzere Laufzeit und ein Wasservorrat eine etwas größere oder geringere Reserve — wie gewünscht — ergibt.

Seitens der Gegner einer Normung, Typung und Standardisierung wird ferner darauf hingewiesen, daß eine Normung niemals allen Gesichtspunkten und Bedeutungen entsprechen kann und daher einen erhöhten Aufwand oder eine unvollkommenere Lösung ergibt. Dem ist entgegenzuhalten, daß auch in ungünstigen

Fällen oft 80% und mehr der Basiselemente [illegible] werden können, ohne daß die befürchteten Nachteile auftreten. Bei den restlichen kann man immer noch untersuchen, ob man eine später lieferbare und in der Regel teuere Sonderausführung oder die gängige Normenausführung wählen will.

Der Hinweis, daß eine Normung und Typung von Anlagen auf dem Gebiet der Energiewirtschaft den Fortschritt und die Entwicklung behindern, ist bei richtiger Anwendung der Normung und Typung nicht stichhaltig, sondern es läßt sich leicht das Gegenteil nachweisen.

4. Normung und Typung von Energieausrüstungen

Auch bei Anlagen der Energieverteilung und Fortleitung lassen sich recht Normen anwenden. Wenn man auch zunächst nicht ganze Schaltwarten und Umspannwerke typenmäßig festlegen wird, so können jedoch einzelne Fel tafeln, Mittelspannungsanlagen in der Regelbauweise, kleinere Ortsnetz- Kabelstationen, Masten von Übertragungsleitungen und zahllose Einzelt einer Normung und Typung unterworfen werden. Die Erfahrungen zeigen daß nicht nur bei Investträgern, sondern auch bei Projektierungs- und Fe betrieben gewisse noch bestehende Ansichten und Bindungen an bestimmte Fabrikationen, z. B. AEG-SSW, überwunden werden müssen.

Durch die Anwendung von Typen- und Normenausführungen ist es die Planung von Material und Ausrüstungen nicht mehr wie bisher objekt sondern nach bestimmten Bedarfs- und Produktionsmöglichkeiten vor Die Materialplanung kann dann bereits sehr frühzeitig und genau durch werden, und der heute vielfach fehlende Vorlauf wird erreicht. Auch fü können aus der Fertigung genormte Ausrüstungen kurzfristiger zur V gestellt werden.

Oftmals wurden Teile für gleiche technische Aufgaben und in gleicher Q zum Nachteil des Betreibers von Anlagen unterschiedlich voneinander h um den Kunden zu zwingen, die Ersatzteile von dem ursprünglichen Liefe zu beziehen. Hieraus entwickelte sich oftmals auch der Brauch, Aus möglichst billig abzugeben, um dann später um so mehr an den nicht ande beziehenden Ersatzteilen zu verdienen.

Durch die Anwendung von Normenausführungen ergeben sich für rüstungen abgekürzte Erprobungszeiten, und die Gefahr, daß Rücksch treten oder Konstruktionsfehler einzelner Teile die Inbetriebnahme der anlage verzögern, ist nicht vorhanden.

Durch die erwähnten kurzen Erprobungszeiten, durch kurze Repara Überholungszeiten ergibt sich für die Energieerzeugung ein realer L zuwachs.

In unseren Kraftwerken sind eine Vielzahl von Ausführungen an Ha rüstungen vorhanden. Oftmals hat diese Vielzahl nichts mit Zweckmäß Wirtschaftlichkeit oder technischen Gründen zu tun. Sie sind oft aus fr kapitalistisch bedingten Gesichtspunkten, Verteilung der Aufträge, Aktien Aufsichtsrateinflüssen usw. zu begründen. Bei z. B. zwanzig gleichen Tur ausführungen wird man ohne weiteres wenigstens eine Reserve, „Indukto Turbinenläufer", beschaffen können, bei zwanzig verschiedenen Turbinena rungen wird dieses nicht möglich sein. Man wird im letzteren Fall die entste Ausfallzeiten und Minderproduktionen in Kauf nehmen müssen.

Ich hatte bereits eingangs darauf hingewiesen, welche Vorteile in unserer sozialistischen Wirtschaft gegenüber der kapitalistischen Wirtschaft durch die Anwendung weitgehend genormter Ausrüstungen entstehen. Daß dies auch im Westen unseres Landes anerkannt wird, geht aus nachstehender Zeitungsnotiz hervor:

„Eine Niederlage der ‚ratio'

In der Holzbearbeitungs-Maschinenindustrie sind die Bestrebungen, eine Typenbeschränkung bzw. Programmbereinigung zu erreichen, wie die Rationalisierungsgemeinschaft Typisierung mitteilt, gescheitert. Dies geschah, obwohl man die entsprechenden Erfolge in der sowjetischen Besatzungszone kennt und fast mit Neid registriert."

Es muß weiter darauf hingewiesen werden, daß der bereits erwähnte reale Leistungszuwachs durch Anwendung von Normausführungen der Hauptausrüstungen bisher viel zu wenig beachtet worden ist und daß sich durch diesen Ausfall manche der früher aufgestellten Berechnungen zur Ermittlung wirtschaftlichster Aggregatgrößen als nicht zutreffend erwiesen haben.

Die Wirtschaftlichkeit einer Anlage hängt nicht nur vom möglichst geringen Materialaufwand und einer wirtschaftlichen Berechnung und Dimensionierung ab, sondern auch von der mit der Anlage im Jahr zu erreichenden Betriebsstundenzahl mit der darin enthaltenen Produktion. Letztere ist aber bei Werken mit gleichen Ausrüstungen am höchsten. Auch die Vorteile, die sich durch gleichartige Bedienung, Reparaturen, Sammlung von Erfahrungen, erhöhte Betriebssicherheit, einheitliche Normzeiten für Reparaturen, gleichmäßige Ausbildung des Personals und bessere konstruktive Durcharbeitung der Typen und Konstruktion von Maschinen erreicht werden können, sprechen für Typenausführungen. Sie gestatten auch einheitliche Betriebsvorschriften, eine bessere Ausbildung und Austausch des Bedienungspersonals. Es bietet der heute vorhandene Zusammenschluß der Kraftwerke in dem Verbundnetz unter Fortfall der früher oftmals vorherrschenden lokalen Gesichtspunkte auch die Möglichkeit, die Typen zu beschränken.

5. Einfluß der Normung und Typung auf Energieprojekte

Durch einheitliche Ausführung nach Normen können im erheblichen Umfang Projektierungs- und Konstruktionskräfte eingespart werden. Die in sämtlichen Projektierungs- und Konstruktionsbüros vorhandene Terminnot verhindert oft eine eingehende und sorgfältige Bearbeitung. Auszuführende Projekte können demnach sorgfältiger und reichhaltiger gestaltet werden. Daneben wird das ing.-techn. Personal für Forschung und Entwicklung solcher Anlagen wie auch in der Fertigung eingesetzt werden können.

Es wäre auch falsch, eine Norm als starr aufzufassen. Sobald der technische Fortschritt und die Bewährung einer Ausführung in einer Versuchsanlage nachgewiesen ist, wird man auch die Norm entsprechend ergänzen bzw. erneuern.

6. Begriffe der Normung, Typung und Standardisierung bei Energieanlagen

Zunächst müssen bei allen Ausrüstungen beim Aufbau der Maschinenelemente die bestehenden Normen, sei es DIN-, VDE-, Werks- bzw. Hausnormen, angewandt werden. Wir werden aber in der Regel für Energieanlagen nicht alle vorhandenen Normen einer Normenreihe zur Anwendung bringen, sondern nur bestimmte

Normteile auswählen, z. B. bestimmte Flanschausführungen, bestimmte Rohrabmessungen, Meßkabel mit bestimmten Aderzahlen und Querschnitten, bestimmte Mastkonstruktionen usw. Man wird auch eine Auswahl aus Druck, Temperaturstufen, Spannungen usw. zur Anwendung bringen. Wir unterscheiden weiter Bauteile einer Anlage, worunter z. B. Kessel, Turbinen, Pumpen, Innenraum-Schaltanlagen usw. zu verstehen sind. Diese Bauteile können Vortypen oder Typen sein.

Eine nächst höhere Stufe der Vereinheitlichung ist die Zusammenfassung von Bauteilen zu Baueinheiten, z. B. Kesselhäuser, Maschinenhäuser, Schaltanlagen usw.

Als letzte erreichbare Stufe auf dem Gebiet der Kraftwerksnormung wäre die Zusammenfassung von Baueinheiten zu verschiedenen Kraftwerkstypen zu verstehen.

7. Anwendung der Normung und Typung bei Energieprojekten

Beispiel 1. Dampferzeuger

Die Neukonstruktion eines größeren Dampferzeugers dauert etwa 3 Monate mehr. Jede Neukonstruktion muß ferner einer eingehenden Prüfung und Genehmigung unterzogen werden, die etwa 1 Monat dauert. Hieran schließt die Herstellung der Werkstattzeichnungen, Material- und Stücklisten, die für die etwa 4 Monate benötigt werden. Es vergehen also rund 8 Monate, bis dahin das benötigte Material verfügbar ist, bis mit der Werkstattfertigung begonnen werden kann.

Wird dagegen eine bereits in Projekt und Konstruktionszeichnungen vorliegende Kesseltype gewählt, dann kann bereits nach einem Monat, der etwa für die Ausschreibung von Werkstattaufträgen auf Grund der vorhandenen Material- und Stücklisten ausreicht, mit der Werkstattfertigung begonnen werden. Die Prüfung und Genehmigung dauert, da bereits eine generelle Typengenehmigung vorliegt, nur etwa eine Woche, so daß sich durch Wahl eines Typenkessels ein Zeitersparnis von 6 Monaten 3 Wochen ergibt. Auch die Abgabe eines Angebots kann bei einer Neukonstruktion demnach erst nach 3 Monaten erfolgen, während das Angebot eines Typenkessels auf Grund der vorhandenen Unterlagen fristig erfolgen kann. Bei letzterem werden auch die bei Neukonstruktionen in der Regel auftretenden Verzögerungen durch Rückfragen und Antworten geringer.

Beispiel 2. Schalttafeln für Warten

Die Schaltwarten in Kraft- und Umspannwerken haben ein unterschiedliches Aussehen. Letzteres ist aber nicht nur durch die verschiedenen Anforderungen, sondern durch verschiedene Bearbeitung und unterschiedliche Wünsche der Investträger bedingt. Unsere Untersuchungen haben ergeben, daß man mit einer bestimmten Anzahl von Schalttafeln für die meisten Schaltfelder auskommt und daß diese Tafeln einheitlich ausgeführt werden können. Selbstverständlich gibt es hierbei Unterschiede, die durch die Reichhaltigkeit der Ausrüstung, kleinere, mittlere und größere Generatoren, Mittel- und Höchstspannungsleitungen usw., bedingt sind. Legt man diese Schalttafeln in Abmessungen, Instrumentenbestückung, Verdrahtung, Klemmenanordnung usw. fest, dann ist die Möglichkeit

gegeben, aus solchen Tafeln, zu denen auch technologische Beschreibungen, Verdrahtungen und Kosten aufgestellt werden, leicht und schnell beliebige Warten, die den jeweiligen Ansprüchen genügen, zusammenzustellen. Auch hier kann demnach die Projektierung ganz erheblich vereinfacht und die Zeit wesentlich herabgesetzt werden, auch wenn noch in der Warte eine Anzahl von Tafeln gesondert projektiert werden müssen, die durch die örtlichen Verhältnisse bedingt sind und die sich deshalb nicht zur Typung eignen.

Beispiel 3. Typenblätter für Dampferzeuger und Turbinen

Durch Aufstellung von Typenblättern für Kessel und Turbinen, aus denen alle technischen Daten eines Typenmodells hervorgehen und die auch Fundamentplan, Motorenliste, Preisblatt sowie die Blockabmaße und Lage der Rohrleitungsanschlüsse enthalten, können die Projektierungsarbeiten erheblich vereinfacht und abgekürzt werden. Es können Sofortangebote für Exportaufträge in technisch gutem Umfange kurzfristig hergestellt werden. Beispielsweise kann bei Aufträgen unter Verwertung der betreffenden Kessel- und Turbinenblätter ohne Verzögerung mit der Konstruktion von Anlagen, in denen solche Aggregate vorkommen, begonnen werden.

Ein Typenblatt von Energieausrüstungen wird im allgemeinen folgende Bestandteile enthalten:

1. eine Maßzeichnung mit Angabe der Fundamente der betreffenden Ausrüstung,
2. eine hierzugehörige technologische Beschreibung,
3. ein Preisblatt.

Diese Unterlagen, die natürlich bei großen Ausrüstungen, z. B. Turbinen und Kesseln, noch reichhaltiger sind, werden im Laufe der Zeit auf alle Ausrüstungen ausgedehnt und den Projekteuren zur Verfügung gestellt. Durch Verwendung dieser Typenblätter können Projekte schnell und vielgestaltig unter Vermeidung von Rückfragen zusammengestellt werden. Technische Garantie- und Lieferbedingungen gehören ebenfalls zu diesen Unterlagen.

Beispiel 4. Rohrleitungen in Kraftwerken

Rohrleitungen innerhalb der Kessel- und Turbinenlieferungen sowie die verbindenden Rohrleitungen werden zwar nach DIN-Normen hergestellt, es gibt aber für jede Druckstufe eine Anzahl genormter Ausführungsmöglichkeiten. Ziel muß es jedoch sein, für jede Druckstufe nur diejenigen Ausführungen vorzusehen, die am zweckmäßigsten sind, und im Interesse der Unterhaltung und der Reparaturmaterialien gleichmäßige Ausführungen für die Rohrleitungen innerhalb des Turbinen- und Kesselblocks sowie der übrigen Rohrleitungsanlagen anzuwenden. Wenige Schiebergrößen sind anzustreben.

Beispiel 5. Höchstspannungsleitungen

Die Höchstspannungsleitungen sind in der DDR auf Masten unterschiedlichster Konstruktion verlegt. Dies liegt daran, daß die früheren Baufirmen unterschiedliche Ausführungen wählten und daß auch die Investträger verschiedene Wünsche hatten, auch wenn praktisch gleiche Betriebsbedingungen vorlagen. Auch hier wird es möglich sein, mit verhältnismäßig wenigen Masttypen auszukommen.

Die unterschiedliche Ausführung von Masten unserer Höchstspannungsleitungen, die fast in jedem der früheren Energieversorgungsgebiete andere Formen aufweist,

ist nicht nur durch die verschiedenartigen Auffassungen der Besteller, sondern auch durch die der Baufirmen bedingt. Abgesehen von gewissen klimatischen Einflüssen, wie Rauhreif und Gewitterhäufigkeit, waren verschiedene Gesichtspunkte maßgebend, beispielsweise: geringster Materialaufwand, geringe Breite der Leitungsanordnung in bebauten und waldigen Gebieten, billige Einzelfundamente, möglichst hoher Schutzwert bei Erdseilanordnung, schönes Aussehen im Landschaftsbild und andere derartige Gründe. Je nachdem nun auf den einen oder den anderen Vorzug größeres Gewicht gelegt wurde, erklärt sich die Vielfalt der Ausführungen. Man hat zwar durch diese individuelle Anpassung an die jeweils zweckmäßigen Verhältnisse die Möglichkeit, eine scheinbar günstigste Lösung zu wählen, hat jedoch nicht beachtet, welche erheblichen Vorteile durch die Anwendung weniger möglichst zweckmäßiger Masttypen bei allen Energieübertragungen, es in der Materialplanung, in der Werkstattfertigung, Austauschbarkeit und kürzung der Projektierungszeiten entstehen. Auch in Katastrophenfällen schneller geholfen werden.

Es wird aus den obengenannten Gründen nicht einfach sein, hier Lösungen finden, die von allen Energieversorgungen gleich gut beurteilt werden. Es ist ebenso sicher sein, daß wir heute bei dem Zusammenschluß der gesamten Energieübertragung nicht weiter für gleiche Bedingungen eine große Anzahl unterschiedlicher Ausführungen beibehalten können.

Beispiel 6. Ortsnetze und Schaltstationen

Auch auf diesem Gebiet sind schon weitgehende Normarbeiten durchgeführt worden. Wir haben nicht nur Normen für Zubehörteile von Ortsnetzstationen, auch Ortsnetzstationen für Freileitungen und Kabelanschluß entwickelt.

Diese wenigen Beispiele zeigen, daß es auf allen Gebieten der Energieübertragung und Verteilung möglich ist, Vereinheitlichungen durchzuführen, zu einer erheblichen Beschleunigung in der Projektierung, Vereinfachung der Materialbeschaffung und Bevorratung sowie Austauschbarkeit führen.

8. Maßnahmen zur Sicherung der Anwendung von Typen und Normen

Um bestehende Typen und Normen weitgehend anzuwenden, gibt es Möglichkeiten:

1. In jedem Projekt müssen die Anlagenteile und Ausrüstungen eine Bezeichnung erhalten, aus der klar ersichtlich ist, ob es sich um eine Typenausführung oder um eine Sonderausführung handelt. Es ist das in Frage kommende Normblatt bzw. Normblatt anzugeben. Kann eine Norm nicht verwendet werden, so ist besonders zu begründen.

2. Zur Begünstigung der Einführung von Normen sollte man auch seitens des Lieferers bei Angeboten von Normteilen und Normausrüstungen die gegenüber Sonderausführungen tatsächlich erreichbaren kürzeren Lieferzeiten und billigeren Preise nennen. Damit würde man erreichen, daß sich auch andere Stellen, z. B. die Investbank, noch stärker für die Anwendung von Normenausführungen interessieren, und den Investträger zwingen, etwaige Sonderausführungen eingehend zu begründen.

Auf die gesetzlichen Grundlagen, die sich durch eine Standardisierung ergeben, komme ich noch zurück.

[illegible] Ersparnis an Zeit und Kosten durch Benutzung von Typen bei Energieanlagen

[illegible]pitel. *Dampferzeuger*

[illegible] wurde bereits darauf hingewiesen, daß bei der Konstruktion und Ausführung [illegible] großen Kessels durch Anwendung einer Typenausführung 6 Monate und [illegible]chen eingespart werden können. Im Zuge dieser Einsparung kommt noch [illegible]weise eine Einsparung von 1 Monat und 1 Woche dadurch hinzu, daß [illegible]ung einer Typenausführung wesentlich schneller erfolgt, so daß man [illegible] mit einer Einsparung von 8 Monaten für die Kesselanlage des betreffenden [illegible]chnen kann. Hat das betreffende Kraftwerk eine installierte Leistung [illegible] MW und kostet das installierte kW 750 DM, dann betragen die Gesamt-[illegible] Werkes 150000000 DM. Rechnet man nur eine Verzinsung und Amorti-[illegible] von 3%, dann muß dieses Kapital jährlich mit 4500000 DM verzinst und [illegible]t werden. In den oben angegebenen 8 Monaten entfällt demnach ein [illegible]aufwand von 3 Millionen DM. Weiter wäre die erwähnte Anlage imstande, [illegible] bei 6000 Benutzungsstunden 1200000000 kWh oder in 8 Monaten rund [illegible] Millionen kWh mehr zu erzeugen. Bei Ausfall dieser Produktion entsteht [illegible] ein weit größerer Nachteil für die Volkswirtschaft durch Ausfall an [illegible]produkten.

[illegible] nur aus diesem einfachen Beispiel, welch großen volkswirtschaftlichen [illegible] nicht nur die Beschleunigung von Reparaturen, sondern auch die Er-[illegible] von Energieanlagen durch Anwendung von Normen und Typen hat. Ähn-[illegible]tungen lassen sich auch für kleinere Werke und andere Energieaus-[illegible] anstellen.

[illegible] der Normung und Typung auf Energie-Reparaturen — Induktor-[illegible]

[illegible]nommen, es fällt durch Wicklungsschluß der Induktor einer 25-MW-[illegible] aus, dann kann die Wiederinbetriebnahme der Maschine

[illegible] einer Reparaturzeit einschl. Ausbau und Wiedereinbau von etwa [illegible] Monaten oder

b) durch Ausbau des defekten Induktors und Einbau eines vorrätig gehaltenen Reserveinduktors innerhalb von 10 Tagen erfolgen.

Im ersten Fall erhält man im Mittel bei 6000 Benutzungsstunden eine jährliche Produktion von 150 MWh, je Tag 410000 kWh. Es fallen demnach aus im 1. Fall 100 MWh, im 2. Fall 4,1 MWh. Durch Einheitsausführung der betreffenden Turbinentype, für die ein Reserve-Induktor bereitgestellt werden kann, würden demnach 100 — 4,1 = 95,9 MWh Produktionsausfall vermieden werden.

Rechnet man den Wert der erzeugten kW-Stunden mit 2,6 Pf., dann erhält man eine Mehrproduktion im Werte von 250000,— DM.

Eine derartige Mehrproduktion wirkt sich aber nicht nur vorteilhaft auf die Energieerzeugung, sondern auch in noch viel höherem Maße auf die anderen Produktionsgüter-Industrien aus, bei denen mit jeder kWh ein Vielfaches ihres Wertes produziert werden kann.

11. Die Anwendung der Normung und Typung von Energieanlagen in anderen Ländern

Während sich bei uns immer noch Kollegen einer Normung und Typung gegenüber ablehnend verhalten oder unter der Normung und Typung vorwiegend nur die

bereits erwähnten Schwerpunktaufgaben hat die Normung und Typung von Energie-Erzeugnissen und Verteilungsanlagen sowohl in der SU wie auch in den Volksdemokratien, teilweise aber auch in Westdeutschland und Amerika, einen erheblichen Umfang angenommen, und die Zahl der Ingenieure, die in diesem Aufgabengebiet eingesetzt werden, nimmt ständig zu. Das Studium der Entwicklung der Normung und Typung, insbesondere des bisher in der SU und in den Volksdemokratien erreichten Standes, hat bereits ein hohes Maß von Vollkommenheit angenommen, und wir haben auf diesem Gebiet sehr viel aufzuholen. In der SU ist das Arbeiten nach Typen bereits seit langem eine Selbstverständlichkeit, und die Vorteile, die sich durch Anwendung von einheitlichen Montage-Technologien in der Materialbeschaffung, in der Ersatzteilfrage, Austauschbarkeit usw., ergeben, werden vielfach bei uns noch nicht in dem erforderlichen Maße gewürdigt.

Wenn man sich in der ČSR heute, nachdem man die wichtigen Bauteile und Baueinheiten teilweise getypt hat, bereits mit der Entwicklung von Kraftwerkstypen von 100 MW und mehr beschäftigt, so zeigt uns dieses den dort bereits erreichten hohen Stand auf diesem Gebiete. Damit wir hier nicht zurückbleiben, muß an die Investitionsträger die Forderung gerichtet werden, möglichst auf Sonderausführungen zu verzichten, dafür aber Vorschläge zu machen, welche bewährten und guten Ausführungen, mit denen sie gute Erfahrungen gemacht haben, als Typen festgelegt werden können.

Wir können es uns bei unserem heutigen Mangel an Fachkräften und Bestrebungen zur schnelleren Behebung des Engpasses in der Energiewirtschaft und zur Förderung unserer Exporte nicht leisten, zahlreiche oftmals nicht begründende Sonderausführungen parallel laufen zu lassen. Wir werden bei der Prüfung der Energieprojekte in dem Maße, in dem Normen aufgestellt festgelegt werden, darauf sehen, daß nur genormte und getypte Anlagen zur Anwendung kommen. Damit wir aber bei diesen Normen die bestmögliche zweckmäßigste Lösung finden, möchte ich alle in Frage kommenden zur Mitarbeit auf diesem Gebiet auffordern.

12. Gesetzliche Grundlagen für die Normung und Typung von Energieanlagen

Bei dem VEB Energieprojektierung ist auf Grund eines Ministerratsbeschlusses vom 17. 12. 1953 durch den Minister für Schwerindustrie ein Ingenieurkollektiv gebildet worden, dessen Aufgabe es ist, eine Typisierung und Normung von Energieanlagen durchzuführen. Dieses Ingenieurkollektiv stellt Normen und Typen für Energieanlagen auf und prüft, ob in Projekten die von ihm und der Industrie aufgestellten Normausführungen zur Anwendung kommen.

Es muß ferner auf das Gesetzblatt Nr. 86 vom 9. 10. 1954, enthaltend die Verordnung über die Einführung staatlicher Standards und Durchführung der Standardisierungsarbeiten in der DDR vom 30. 9. 1954, hingewiesen werden, in dem es heißt:

> Eine entscheidende Voraussetzung zur Vermeidung großer volkswirtschaftlicher Verluste, für die Senkung der Selbstkosten und für die Schaffung einer einheitlichen Ordnung in der Technik und damit für die Steigerung der Arbeitsproduktivität in der Deutschen Demokratischen Republik ist die Normung der Produktion und der technischen Dienste in Industrie und Landwirtschaft, im Verkehr und in den übrigen Wirtschaftszweigen mittels staatlicher Standards

Mit Hilfe von staatlichen Standards ist es möglich, die Qualität zu steigern, die Einheitlichkeit und Austauschbarkeit der Erzeugnisse zu verbessern und die oft unbegründete Vielzahl ähnlicher Erzeugnisse und ihrer Einzelteile einzuschränken sowie Material und Arbeitszeit einzusparen.

Es wird deshalb folgendes angeordnet:

§ 1

Staatliche Standards sind rechtsverbindliche technische Vorschriften, die zur Sicherung

der Qualität,

der Vereinheitlichung und Austauschbarkeit von Einzelteilen, Baugruppen, Geräten und Maschinen,

einer sparsamen Verwendung von Rohstoffen, Grund- und Hilfsmaterial, Werkstoffen und Energie,

der Senkung der Selbstkosten,

der Verkürzung von Projektierungs- und Konstruktionsarbeiten,

der planmäßigen Aufnahme neuer Fertigungen der industriellen und landwirtschaftlichen Produktion festgelegt werden.

Erwähnen aus dieser Verordnung nur noch die §§ 6 und 14 erwähnen, die folgenden Wortlaut haben:

§ 6

Die verantwortlich leitenden Mitarbeiter in der Wirtschaft und in den staatlichen Organen sind verpflichtet, die staatlichen Standards einzuhalten und anzuwenden bzw. ihre Einhaltung und Anwendung zu überwachen.

§ 14

1. Zur erfolgreichen Durchführung der Arbeiten auf dem Gebiet der Normung der Produktion (Werknormung) sind in den volkseigenen Betrieben, zentralen Konstruktionsbüros und in den Forschungs- und Entwicklungsstellen der Deutschen Demokratischen Republik entsprechend ihrer Größe und Bedeutung Werknormenbüros zu bilden oder Beauftragte für Normung einzusetzen.

2. Die Hauptaufgaben der Werknormenbüros bzw. des Beauftragten sind:

a) Festlegung von Werknormen für die Konstruktion, Technologie, Fertigung, Planung und Verwaltung, wie sie für die rationelle Produktion des Betriebes erforderlich sind unter Berücksichtigung staatlicher Standards;

b) Überprüfung der Projektierungs- und Konstruktionszeichnungen für die laufende und neu aufzunehmende Produktion unter Beachtung der staatlichen Standards und Werknormen;

c) Übe prüfung der Betriebs- und Fertigungsmittel bzw. ihrer zeichnerischen Unterlagen auf normgerechte Ausführung;

d) Erfahrungsaustausch mit Werknormenbüros anderer Betriebe.

3. Die zuständigen Ministerien und Staatssekretariate werden beauftragt, für ihren Bereich Werknormenbüros oder Beauftragte für Normung in den bestätigten Struktur- und Stellenplänen der Betriebe, zentralen Konstruktionsbüros und in den Forschungs- und Entwicklungsstellen vorzusehen.

13. Verlauf der Normung und Typung von Energieanlagen und Ausrüstu

Die im Ingenieurkollektiv der Energieprojektierung durchzuführenden mungs- und Typungsarbeiten werden auf Grund von Aufgabenstellungen Ministeriums für Schwerindustrie durchgeführt. Es werden auch bestehende VEM, EK und sonstige Normen in bezug auf deren Anwendung in Energie überprüft. Die aufgestellten Normentwürfe werden über das Ministeri Schwerindustrie Fachkommissionen zugeleitet, in denen diese Entwürfe werden. Es erfolgt dann eine Beurteilung bzw. Genehmigung durch das Mi Hiermit ist dann die Anwendung dieser Normen für Energieanlagen Das gleiche gilt für techn. Garantie- und Lieferbedingungen, Betrieb usw.

Für Normen von besonderer Bedeutung wurde dann gemäß Ge die Standardisierung beantragt, womit die Anwendung dieser Norm lich vorgeschrieben ist.

Um aufgestellte, geeignete Normentwürfe bereits frühzeitig im Interesse einer Vereinheitlichung der Projekte der vor der endgültigen Genehmigung eine Erklärung als Norm

14. Schlußwort

Die verschiedenen Ausführungen [illegible]

[illegible]

25X1

[illegible]konstruktive Änderungen im Gittermastbau mit Erläuterung der [illegible]chnungsweise

[illegible] K. Beeke, Berlin

[illegible] von denen größere Querkräfte übertragen werden müssen, sind [illegible] mit Kreuzdiagonalen ausgebildet.

[illegible]ung der Kreuzdiagonalen wird vorausgesetzt, daß die Querkräfte [illegible] bzw. Zugkräfte von den Diagonalen nach den Fundamenten [illegible] Sinngemäß ist das im Fall der Ausnahmebelastung auftretende [illegible] ebenfalls von den Diagonalen zu übertragen, wobei das [illegible]ige Querkraft in die Diagonalen eingeleitet wird. Auch hierbei [illegible] Druckkräfte. Eine Festlegung der Querkraftrichtung ist im [illegible] möglich, zumindest nicht bei Tragmasten und nur bedingt bei [illegible]typen. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, beide Diagonalen [illegible] so zu dimensionieren, daß sie Druckkräfte einwandfrei zu über- [illegible] sind, d. h., sie sind entsprechend ihrer Knicklänge und dem [illegible] für den σ-fachen Wert zu bemessen. Besonders bei sehr breiten [illegible] und mehr am Mastfuß) sind mit Rücksicht auf die sehr großen [illegible] stärkere Winkelprofile erforderlich, obwohl die Querkräfte infolge [illegible] Mastverjüngung sich ergebenden Querkraftabzugs erheblich ab- [illegible]. Die σ-fache Vervielfältigung liegt allgemein erheblich über dem [illegible]

[illegible] Anschluß der Diagonalen an den Eckwinkel genügt meist ein Niet [illegible] Schraube. Infolgedessen ist bei der Nachweisführung der Beanspruchun- [illegible] der Zugdiagonale unter Beachtung der Vorschriften nur mit dem um den [illegible]querschnitt geschwächten angeschlossenen Schenkel zu rechnen, wobei also [illegible] der halbe Winkelquerschnitt vernachlässigt wird. Die Rechenvorschrift ist [illegible] begründet, als bei dem Anschluß durch nur ein Verbindungsmittel sich [illegible] dem Bruch eine Bruchquerschnittsfläche ausbildet, die dem rechnerischen [illegible]stquerschnitt entspricht.

Statisch wird der Mast bzw. eine Mastwand, die mit Kreuzdiagonalen (Zug- und Druckdiagonalen in einem Kreuzfeld) ausgestattet ist, als starre Scheibe angesehen. Hierbei ist grundsätzlich vorauszusetzen, daß sich beide Gründungskörper gleichmäßig an der Übernahme der jeweiligen Querkraftanteile beteiligen (Bild 1). Bereits ein geringfügiges, unterschiedliches Ausweichen des einen Gründungskörpers gegenüber dem anderen bei Einzelblock- oder Pilzgründungen, wie sie bei diesen Masttypen fast ausschließlich angewendet werden, führt dazu, daß unkontrollierbare Zusatzspannungen im Mastunterteil entstehen.

Ausgehend von diesen Gesichtspunkten ist nun zu untersuchen, ob die konstruktive Ausbildung des Mastes anders gestaltet werden kann, wobei die Scheibenwirkung jedoch erhalten bleiben muß, also die Querkräfte sicher übertragen werden.

Das Viereck (Bild 2) sei mit sogenannten schlaffen Diagonalen, also nicht knicksicheren Verstrebungen, ausgestattet. Die gestrichelt angedeutete Verformung unter der Einwirkung von Querkräften kann nur eintreten, wenn die Zugdiagonale eine Verlängerung erfährt. Die Druckdiagonale würde, wenn sie z. B. aus Flacheisen besteht, zu Beginn der Einwirkung der Kraft ebenfalls noch einen kleinen Querkraftanteil übernehmen, dann allerdings seitlich ausweichen. In diesem

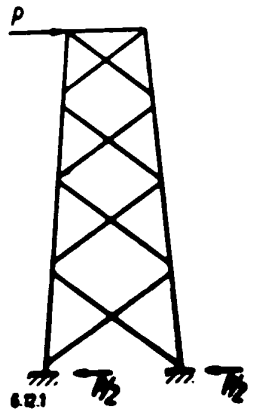


Bild 1.

Augenblick muß die Zugdiagonale die gesamte Querkraft aufnehmen. zugehörigen Querriegel müssen ebenfalls in der Lage sein, die Quer... tragen, sind also drucksicher auszubilden, wobei unter drucksicher... Dimensionierung zu verstehen ist.

Die Anordnung von schlaffen Diagonalen, bei denen nur Zugdiagon... tatsächlich angreifende Querkraft zu dimensionieren sind, wird ganz

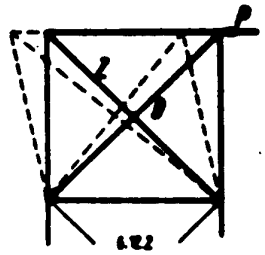


Bild 2.

dann von Vorteil sein, wenn es sich um verhältnismäßig lange bzw. ... Diagonalen handelt. Müssen solche Diagonalen nämlich nach dem ω-Verfahren Druckdiagonalen dimensioniert werden, so ist mit Rücksicht darauf der ... schnitt meistens mehr als 2fach und vielfach 3- und 4fach größer zu dimen... nieren, als er etwa für eine Zugdiagonale notwendig ist.

Diese Überlegungen wurden bereits praktisch durch eine rechnerische Gegenüberstellung umgesetzt. Es wurde bei VEB Energieprojektierung an einem nach der bisher üblichen Methode dimensionierten Mast überprüft, ob und welche Ma... sparnisse an Profileisen sich erzielen lassen. Hierbei handelt es sich um ein...

[illegible]-4-Mast, Trassenwinkel 143 bis 161° einer 110-kV-Leitung, belegt mit zwei [illegible] 50 mm² St III gespannt 24 kg/mm² und 2 × 3 Phasenseilen 185 mm² StAl [illegible]gespannt mit 8,25 kg/mm². Die Gegenüberstellung der alten Ausführung [illegible]gdiagonalenausführung ergab eine Einsparung von 450 kg Profilstahl [illegible] Mastverstrebung bzw. 12,4 % an Gesamtgewicht des Mastes, obwohl [illegible]weise knicksichere Querriegel erfordert. Als Diagonalen wurden Flach-[illegible]- bzw. Schraubenanschluß verwendet.

[illegible]liche Weiterung würde das Prinzip der Zugdiagonalen erfahren, wenn [illegible] durch Schweißung erfolgen würde, da dann Querschnittsschwächun-[illegible] auftreten, also noch erheblich mehr eingespart werden könnte. [illegible] noch weitere Punkte hervorzuheben:

[illegible] kann beliebig breit angeordnet werden, ohne dabei von der [illegible] Steifheit der Diagonalen wesentlich beeinflußt zu werden. [illegible] der Mittelfingenalen wird durch Umgehen des ω-Verfahrens [illegible] weniger Zeit.

[illegible] können so angeordnet werden, daß eine fast gleichmäßige [illegible] vom Mastspitze bis Mastfuß erzielt werden kann. [illegible]

[illegible] der Verteile läßt sich noch fortsetzen.

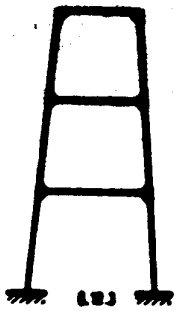


Bild 3.

[illegible] in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben, daß das Prinzip [illegible] Diagonalen schon lange bekannt ist und auch angewendet worden [illegible] auf dem Gebiet des Brückenbaues.

[illegible] der Anwendung von Zugdiagonalen läßt sich aber auch durch biegesteife [illegible]riegelanschlüsse eine einwandfreie Ableitung der am Mast angreifenden Kräfte [illegible]. Der Mast erreicht dann die Form eines Rahmengebildes (Bild 3). Der Be-[illegible]ungsgang wird insofern umfangreicher, als je nach Anzahl der Belastungs-[illegible] mehrere lineare Gleichungssysteme aufzulösen sind. Eine Zusammenziehung der Einzelbelastungsfälle empfiehlt sich für den Anfang nicht, zumindest so lange nicht, bis eine hinreichende Erfahrung für die Größenordnung der statischen Werte zur Dimensionierung der Einzeltragglieder vorliegt. Es ist übersichtlicher, die statischen Werte aus den Superpositionen der sich aus den Einzelauflösungen der Belastungsfälle ergebenden Größen zu gewinnen und außerdem ist ein einwandfreies Erfassen der Maximalwerte anders nicht möglich. Die Auflösung der Gleichungssysteme kann aber weitgehendst schematisiert werden, da die von den

25X1

Längen- und Querschnittsabmessungen der Einzelträgglieder abhängigen Stab-
festwerte für alle Gleichungssysteme konstant bleiben und sofort in einem Rech-
nungsgang mehrere Belastungsfälle parallel durchgezogen werden können. Durch
Ausnutzung von Symmetrie und Antimetrie lassen sich noch weitere Vereinfachun-
gen erzielen.

Es hat also nur den Anschein, als ob der Rechengang sich so komplizieren würde,
daß mit Rücksicht auf dem Umfang die Anwendung des Mastes ohne Diagonale
abzulehnen wäre. Eine nähere Untersuchung ergibt jedoch, daß bei einiger Übung
und möglichster Schematisierung unter Verwendung von bekannten Rechen-
verfahren der Aufwand an Projektierungsarbeit lohnen dürfte, weil sich
größere Einsparungen erzielen lassen. Konstruktive Einzelheiten bezüglich
biegesteifen Anschlüsse der Stäbe (Querriegel) sind in verschiedenster Form
anderen Bauwerken ausgeführt. Die Größe der Knotenmomente im Gitter
hält sich im erträglichen Rahmen, da die Riegel keine äußeren Belastung
halten. Die Anschlüsse können auch ohne Schwierigkeiten ausgeführt
Selbstverständlich wächst der Grad der statischen Unbestimmtheit mit
zahl der geschlossenen Konturen und ist also im gewissen Sinne auch
von der Höhe des Mastes. Es liegt aber andererseits auch klar auf der H
die angeführten Wege zu nicht unerheblichen Materialeinsparungen
bei entsprechender Abstimmung des örtlichen Baugeschehens auch dort
Erschwernisse, sei es für den Aufbau des Mastes selbst oder auch für
steigung usw., ergeben dürften. Selbst dann, wenn teilweise örtlich
Montagehelfe erforderlich werden, sollten die aufgezeigten Wege
unserem Mastbau angestrebt werden, denn sie tragen dazu bei,
erzielen.

Electrical Machines & Transformers

25X1

7. Elektrische Maschinen und Transformatoren

7.1 Das Problem der mechanischen Schwingungen im Elektromaschinenbau

Dr. phil. nat. *H. Schnetz*, Berlin

1. Allgemeines

Die theoretische und experimentelle Untersuchung von mechanischen Schwingungsvorgängen hat in den beiden letzten Jahrzehnten mehr und mehr an Bedeutung gewonnen. Man wurde gezwungen, sich mit diesen Vorgängen zu befassen, weil infolge der Leistungssteigerung für die einzelne Maschine und der intensiveren Materialausnutzung bei der Leichtbauweise die Schwingungsbeanspruchungen gegenüber den statischen Beanspruchungen stärker hervortreten und in vielen Fällen zu Betriebsschäden geführt haben. In besonders starkem Maß traten diese Erscheinungen bei der Weiterentwicklung der Verbrennungsmotoren, insbesondere der Flugmotoren und der Turbinen auf.

Im Elektromaschinenbau haben diese Fragen anfangs noch nicht die gleiche starke Beachtung gefunden. Dies liegt mit daran, daß die Dimensionierung der Hauptteile der Elektromaschinen aus anderen Gründen oft stärker gehalten werden muß, als es vom Festigkeitsstandpunkt aus notwendig erscheint. Aber auch im Elektromaschinenbau hat sich die Leichtbauweise und die stärkere Ausnutzung des Materials durchgesetzt, was schon aus dem Vergleich der Abmessungen von Motoren gleicher Leistung von früher und heute hervorgeht. Setzt man beispielsweise das Gewicht pro 1 kW Leistung für einen Drehstrommotor im Jahr 1900 mit 100 % an, so liegt dieser Kennwert 1925 bei etwa 60 %, 1940 bei 35 % und 1954 bei etwa 30 %. Dementsprechend treten auch hier jetzt häufiger Schwingungsfragen auf. Im starken Maß ergeben sich solche Fragen für den Elektroingenieur, wenn es um den Zusammenbau von Elektromaschinen mit anderen Kraft- oder Arbeitsmaschinen geht, die eine stärkere Schwingungserregung geben, z. B. bei Dieselgeneratoren, elektrischen Schiffsantrieben, Antrieb von Kolbenpumpen usw. Die hier auftretenden Schwingungsfragen müssen in enger Zusammenarbeit zwischen Elektromaschinenbau und allgemeinem Maschinenbau geklärt werden.

2. Grundbegriffe

Bevor im einzelnen auf die Schwingungsprobleme eingegangen wird, sollen zunächst die Grundbegriffe der Schwingungstechnik herausgestellt werden. Zur Charakterisierung einer Schwingung ist es notwendig, ihre Amplitude und ihre Frequenz zu kennen. Man unterscheidet freie und erzwungene Schwingungen.

Freie [illegible] das aus Elastizitäten und Massen [illegible] wie sie z. B. beim Ein- und Ausschalten [illegible] bei Lastausfall auftritt. Je nach der im Schwingungssystem vorhandenen Dämpfung klingt eine solche Schwingung mehr oder weniger schnell ab. Dämpfende Einflüsse sind gegeben durch gleitende Bewegungen zweier Teile aufeinander, z. B. in Lagern, in der Nähe von Schweißungen und bei Schraubenverbindungen, durch Luft- oder Flüssigkeitsreibung, durch Werkstoffdämpfung oder auch elektromagnetische Dämpfung.

Bei weitem häufiger treten *erzwungene* Schwingungen auf, die einem Schwingungsgebilde von einem hiermit gekoppelten Schwingungserreger aufgezwungen werden. Eine besondere Gefahr entsteht dann, wenn die Frequenz der erregenden Schwingung mit der Eigenfrequenz des gekoppelten Schwingungssystems übereinstimmt. Es tritt dann Resonanz ein, und die nur durch die Dämpfung begrenzten Schwingungsausschläge können zu schweren Schäden führen. In einer großen Anzahl von Fällen ist die erregende Frequenz gleich der sekundlichen Drehzahl der Maschine, z. B. bei unsorgfältiger Auswuchtung. Man spricht von „unterkritischem Lauf" der Maschine, wenn die Arbeitsdrehzahl unter der Resonanzdrehzahl liegt, und im umgekehrten Fall von „überkritischem Lauf". Im letztgenannten Fall läuft die Maschine beim Anlauf durch die kritische Drehzahl durch. Um dabei nicht zu starke Schwingausschläge zu bekommen, muß die kritische Drehzahl genügend tief liegen und schnell durchfahren werden.

Für die Beurteilung der Schädlichkeit einer Schwingung ist schließlich auch noch die Kenntnis der Häufigkeit des Auftretens bestimmter Amplitudenwerte wichtig. Die Schwingungen wirken nicht nur auf die Haltbarkeit der Maschinenteile ein, sondern sie beeinflussen auch in starkem Maß die Güte der von den Maschinen geleisteten Arbeit sowie die Arbeitsfähigkeit des Bedienungspersonals, das durch den erzeugten Lärm und durch die Erschütterungen belästigt wird. Schließlich hängt die Sicherheit der Bauwerke, in denen die Maschinen stehen, ebenfalls von der Stärke der aufgezwungenen Schwingungen ab.

8. Schwingungsfragen im Elektromaschinenbau

3.1 unabhängig von An- oder Abtriebsmaschinen

Die Fälle, daß durch die elektrischen Maschinen selber gefährliche Schwingungen erregt werden, sind relativ selten. So kann bei unsymmetrischer Schaltung der Ständerwicklung von Drehstrom-Asynchronmotoren unter Umständen eine stärkere Schwingungserregung eintreten [1]. Vereinzelt wurden Schwingungsschäden an Lufterschaufeln beobachtet. Unter Umständen können auch Schwingungen an den Bürstenhaltern auftreten.

Gefährlich werden Biegeschwingungen des Rotors, wenn seine Biegeeigenfrequenz mit der Drehzahl pro Sekunde übereinstimmt. Durch die immer vorhandene Restunwucht im Rotor wird dann eine Schwingung angeregt, die mit der Frequenz des Rotors umläuft und in der Welle eine statische Belastung hervorruft, auf die Lager und das Gehäuse aber eine umlaufende Kraft abgibt und unter Umständen zum Anlaufen des Rotors am Stator führt. Diese Resonanzdrehzahl bezeichnet man auch als „Biegekritische".

Wenn vorher gesagt wurde, daß festigkeitsmäßig bedenkliche Schwingungen im allgemeinen weniger zu erwarten sind, so können doch die Schwingungen mit kleinen Amplituden unter Umständen zu erheblichen Schallabstrahlungen führen und damit den Maschinenlärm erzeugen. Untersuchungen haben gezeigt, daß neben der schon genannten Biegeschwingung des Rotors vor allem radiale Schwingungen des Stators zur Entstehung des Maschinenlärms von Elektromaschinen beitragen [2]. Bei diesen radialen Schwingungen kann die Kreisringform des Stators erhalten bleiben. Es können aber auch elliptische oder dreieckige Verformungen des Blechpaketes auftreten. Maßgeblich beeinflußt wird die Entstehung derartiger Verformungen durch die Wahl des Nutenzahlverhältnisses.

3.2 *durch An- oder Abtriebsmaschinen bedingt*

Werden die Elektromaschinen mit anderen Maschinen gekoppelt, z. B. bei Dieselgeneratoren, elektrischen Schiffsmaschinen, Antrieb von Kolbenpumpen und anderen Arbeitsmaschinen, so bildet die Gesamtheit ein neues Schwingungssystem,

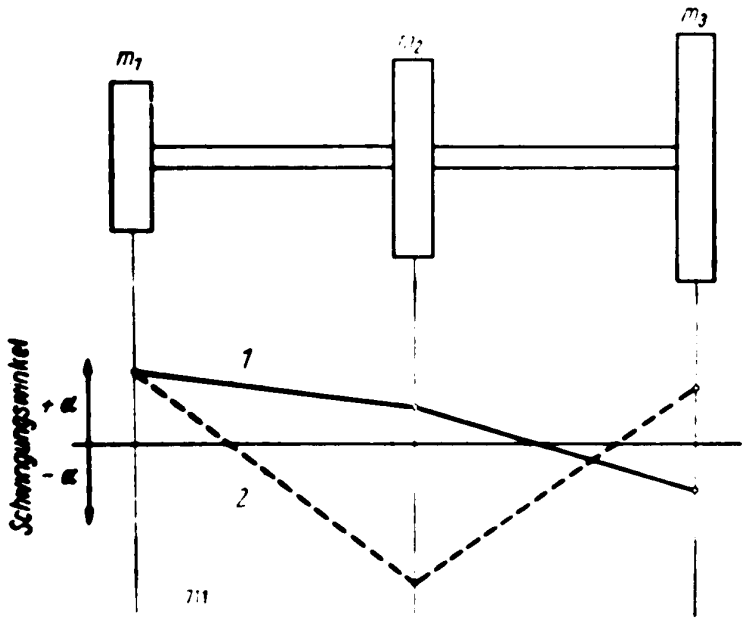


Bild 1. Torsions-Schwingungsformen eines 3-Massensystems

1. Schwingung 1. Grades mit einem Knoten. *2* Schwingung 2. Grades mit zwei Knoten

das nun auch von den gekoppelten Maschinen her angeregt werden kann. Es können dann in den Wellen neben Biegeschwingungen vor allem auch Torsionsschwingungen auftreten. Ein typisches Beispiel hierfür bietet der Dieselgenerator. Für Schwingungsuntersuchungen an einem solchen System ist die Kenntnis der Drehkraftharmonischen bzw. des Ungleichförmigkeitsgrades der Antriebsmaschine wichtig. Als erregende Frequenz tritt nicht nur die der Drehzahl entsprechende auf, sondern auch noch ganz- oder halbzahlige Vielfache derselben. Alle Erregerfrequenzen ändern sich aber proportional mit der Drehzahl, während die Eigenfrequenzen des aus den Elastizitäten und Massen der Antriebs- und Arbeitsmaschine gebildeten

[illegible] Schwingungsgebilde [illegible] Elastizitäten gekoppelter Massen [illegible] Haltung der Massen $K-1$. Ein 3-Massensystem [illegible] zwei Torsionseigenfrequenzen bei zwei verschiedenen Schwingungsformen [illegible] bzw. zwei Schwingungsknoten. Entsprechend der Mehrzahl der Eigenfrequenzen gibt es nun eine ganze Reihe von Resonanzdrehzahlen, die „Torsionskritischen", deren Intensität von der Stärke der einzelnen Drehkraftharmonischen und von der Dämpfung des Schwingungssystems abhängt.

Eine Schwingungserregung in den mit den Elektromaschinen gekoppelten Maschinen kann natürlich auch wieder auf Teile der Elektromaschine, wie Lüfter, Bürstenhalter, Lager usw., zurückwirken und sie evtl. zum Schwingen anregen.

Weiterhin verdienen die Vorgänge Beachtung, die bei stoßartigen Laständerungen unter Umständen Schwingungserscheinungen in den Maschinen auslösen, zumindest aber zu starken Beanspruchungen einzelner Maschinenteile führen. Derartige stoßartige Beanspruchungen treten bei Kurzschlußbelastung oder plötzlicher Lastabschaltung an Generatoren auf oder an Motoren bei stoßartigen, mechanischen Laständerungen der Arbeitsmaschinen.

Schließlich sei noch auf die Bedeutung der Maschinengründung [3] hingewiesen. Eine richtig ausgeführte Maschinengründung kann folgende Aufgaben erfüllen:

1. Schutz des Bauwerkes vor den von den Maschinen hervorgerufenen Schwingungen,
2. Schutz der Maschinen oder Geräte vor Schwingungen, die von außen an sie herangetragen werden,
3. Schutz der Maschinen bei stoßartigen Laständerungen, indem kinetische Energie zunächst in potentielle Energie und erst allmählich durch gedämpfte Schwingungen in Wärmeenergie umgesetzt wird.

Im einfachsten Fall stellt das Maschinenfundament eine schwere Masse dar, auf der das Maschinenaggregat montiert ist [4]. Diese Masse bewirkt dann eine Verringerung der von dem Maschinensatz auf das Gebäude übertragenen Schwingungen. Eine für alle drei vorgenannten Zwecke wirksame Maschinengründung erhält man jedoch nur, wenn man das Fundament selbst wieder federnd aufstellt und ihm so die Möglichkeit zur Ausführung von Schwingungen gibt. Die Eigenfrequenz dieser Schwingung legt man im allgemeinen sehr tief.

Ein Beispiel für die unter 1. genannte Aufgabe gibt die feste Fundamentierung von Turbogeneratoren, die für stoßfreie Belastung vorgesehen sind. Die unter 2. genannte Aufgabe muß beispielsweise die Aufhängung der Bahnmotoren oder elektrischer Schaltgeräte in Bahnen erfüllen, die vor den Lauferschütterungen geschützt werden müssen. Ein Beispiel für die unter 3. genannte Aufgabe ist die federnde Gründung von Stoßgeneratoren, bei denen kurzzeitig mehr als 10fache Überlastung eintreten kann. Würde man hier eine feste Gründung anwenden, so müßte das Fundament sehr große Abmessungen haben, wodurch aber nur ein Erschütterungsschutz der Umgebung, nicht aber eine Herabsetzung der mechanischen Beanspruchungen in der Maschine erreicht würde. Dagegen könnten durch ein richtig bemessenes, federndes Fundament auch die Beanspruchungen auf ein erträgliches Maß herabgedrückt werden.

4. Untersuchungen zur Klärung der Schwingungsfragen

Um die vorstehend angeschnittenen Schwingungsfragen zu klären, wird man teils rechnerisch, teils experimentell vorgehen müssen.

4.1 theoretisch-rechnerisch

Bevor die Hauptabmessungen der Maschine endgültig festgelegt werden, muß die Lage der Biege- und Torsionskritischen im Vergleich zum Arbeitsbereich der Maschine errechnet werden. Die Rechnungsverfahren hierfür sind in der einschlägigen Literatur angegeben [5]. Liegt eine Kritische im Drehzahlbereich, so muß durch Änderung der Elastizitäten oder der Massen eine Verlagerung aus dem Drehzahlbereich heraus erreicht werden. Im allgemeinen soll eine kritische Drehzahl mehr als 15 % über der oberen bzw. unter der unteren Regeldrehzahlgrenze der Maschine liegen. Für die Durchführung der Rechnung, z. B. für einen Dieselgenerator, muß das Elektromotorenwerk mit dem Dieselwerk eng zusammenarbeiten bzw. von diesem alle notwendigen Angaben über Massen, Elastizitäten und Zündkraftharmonische erhalten.

Der Rechnung haften verschiedene Unsicherheiten an, vor allem bei der rechnerischen Ermittlung der Elastizitäten, da beispielsweise nicht immer klar zu erkennen ist, wieweit einzelne Bauteile mittragend wirken. Die Durchführung von Versuchen zur Ermittlung der Elastizitäten, wie sie z. B. im Flugmotorenbau üblich ist, läßt sich bei großen Elektromaschinen kaum ermöglichen, weil einmal die pro Type gebaute Stückzahl zu klein ist und der Aufwand für die notwendigen umfangreichen Verformungsmessungen zu groß wäre. Dem Berechnungsingenieur würde es aber ein größeres Gefühl der Sicherheit geben, wenn in einzelnen Fällen eine experimentelle Nachprüfung der errechneten Resonanzdrehzahlen erfolgen würde. Eine Gegenüberstellung von Rechnungs- und Meßwerten könnte wertvollen Aufschluß über die Fehlergrenzen solcher Rechnungen geben.

Der Rechnung zugänglich ist auch die Frage der Maschinengründung. Voraussetzung dafür ist aber, daß man weiß, welche dynamischen Kräfte abzufangen sind, welche Kräfte vom Fundament auf den Boden übertragen werden dürfen und welche Schwingamplitude das Fundament ausführen darf.

4.2 experimentell

In gewissen Fällen wird sich eine experimentelle Nachprüfung der Feder- und Massenkennwerte durchführen lassen, wenn die Abmessungen der Teile nicht zu groß sind. In den anderen Fällen ist man auf die rechnerische Ermittlung angewiesen.

Die experimentelle Ermittlung der Eigenschwingungszahlen ist, wie später noch gezeigt wird, in verschiedenen Fällen möglich. In manchen Fällen, wie z. B. bei Läuferschaufeln, ist die Berechnung der Eigenfrequenzen so ungenau, daß ohne Messung eine Klärung aufgetretener Schwingungsbrüche nicht möglich ist.

In vielen Fällen ist die Ursache für auftretende Schwingungen in einer Unwucht des Läufers zu suchen, die entweder von Anfang an vorhanden war oder sich erst im Betrieb, beispielsweise durch Verlagern von Wicklungen, durch Wärmeverzug, unrunde Lager o. ä., ergeben hat. Größe und Lage der Unwucht muß experimentell ermittelt und mit den zugelassenen Werten verglichen werden [6]. Eine vollkommene Wuchtung wird man nie erreichen können. Es müssen deshalb höchstzulässige Unwuchten festgelegt werden.

[illegible] durch eine Schwingungsmessung [illegible] Erklärung der Meßergebnisse [illegible] Grund des aufgetretenen Schadens [illegible] Schwingung und der gegebenen Meßmöglichkeiten [illegible] Maschine [illegible] Hinblick auf die vorhandenen Meßmittel entschieden werden, welche Meßmethode angewendet wird. In Frage kommen Messungen von fortschreitenden oder drehenden Bewegungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Dehnungsmessungen, Kraft- und Drehmomentenmessungen. Oft ist auch eine direkte Messung einer gesuchten Größe nicht möglich, und man muß sie dann auf rechnerischem oder auf elektrischem Wege aus einer anderen Größe ermitteln.

Die Durchführung von Geräuschmessungen kann, wenn man sie nicht nur auf die Erfassung der Geräuschstärke, sondern auch auf die Analyse der im Geräusch vorhandenen Frequenzen erstreckt, Hinweise auf fehlerhaftes Arbeiten einzelner Maschinenteile geben. Außerdem werden für bestimmte Zwecke an die elektrischen Maschinen besondere Anforderungen hinsichtlich der Geräuscharmut gestellt [7].

5. Erforderliche Meßeinrichtungen

Für die Ermittlung von Federkonstanten, Durchbiegungen, Drehsteifigkeiten benötigt man im wesentlichen eine Belastungsvorrichtung und Meßgeräte, mit denen man die den Lasten zugehörigen Verformungswerte messen kann. Bei Längs- oder Biegeverformungen kann man als Meßfühler in den meisten Fällen normale Meßuhren verwenden. Bei Torsionsversuchen arbeitet man besser mit zwei an dem zu vermessenden Teil befestigten Spiegeln, die entsprechend der Verdrehung einen Lichtstrahl um einen bestimmten Winkel ablenken. Die Belastung wird je nach der erforderlichen Kraft und der Größe des Teiles direkt durch Gewichte, in Prüfmaschinen oder durch hydraulische Vorrichtungen aufgebracht. Die Messung wird meist von einer Vorlast aus vorgenommen, die den Einfluß evtl. vorhandener Spiele ausgleichen soll. Die absolute maximale Lasthöhe darf die höchste, der Festigkeitsrechnung der Maschine zugrunde gelegte Last nicht überschreiten, um bleibende Verformungen zu vermeiden.

Bei Torsionsmessungen zur Ermittlung der Drehsteifigkeit wird die Kraft über einen Hebelarm eingeleitet oder besser über ein axial gehaltertes Wellrad, um eine zusätzliche Belastung des Prüflings durch Kräfte oder Biegemomente auszuschalten. Das eine Ende des Prüflings greift dann in das Wellrad ein, während das andere Ende gegen Drehung blockiert wird.

Das Massenträgheitsmoment, bezogen auf die Drehachse, erhält man experimentell bei nicht zu großen Teilen durch Auspendeln bei bifilarer Aufhängung (Bild 2). Bei einer Fadenlänge l, einem Fadenabstand $2a$, einem Gewicht des Körpers G und einer Schwingzeit für eine volle Schwingung T ist das Massenträgheitsmoment

$$J = \frac{G\,a^2}{4\,\pi^2\,l}\,T^2 .$$

Im allgemeinen kann man aber die Massenträgheitsmomente bei Elektromaschinen genügend genau berechnen [8].

Zur Ermittlung der Eigenfrequenzen von Schwingungsgebilden kann man sich verschiedener Verfahren bedienen. In vielen Fällen genügt es, das System durch

Anschlagen zum Schwingen zu bringen und die abklingende Schwingung zusammen mit einer Zeitmarke zu registrieren. Für die Registrierung kann die Umwandlung der mechanischen Schwingungen in elektrische mittels eines Adapters vorgenommen werden. Auch zur Anregung von Schwingungen kann man einen Adapter verwenden, dem von einem in der Frequenz regelbaren Tonfrequenzgenerator sinusförmige Wechselspannungen zugeführt werden. Tritt Resonanz mit einer Eigenfrequenz des Prüflings ein, so kann man das Resonanzmaximum oft schon ohne Hilfsgeräte durch Abhören oder Fühlen feststellen und am Tongenerator die Frequenz direkt ablesen. Diese Methode, die bei der Untersuchung von Schaufelschwingungen vielfach angewendet wird, hat den Vorteil, daß nacheinander sämtliche Schwingformen und Eigenfrequenzen einer Schaufel ermittelt werden können, was bei Anregung durch Schlag, wobei sämtliche Schwingungen gleichzeitig auftreten, nicht möglich ist.

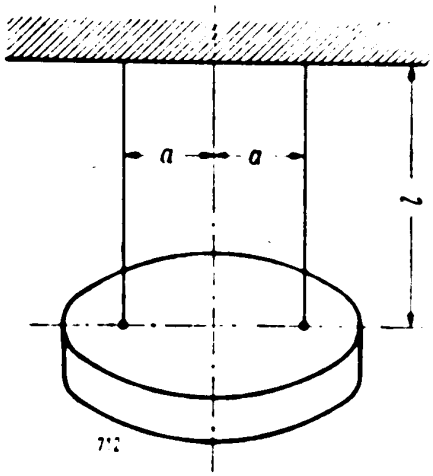


Bild 2. Ermittlung des Massenträgheitsmomentes durch Auspendeln bei bifilarer Aufhängung

Genügt die von einem Adapter abgegebene Energie nicht zur Anregung von Schwingungen, so kann man auch einen entsprechend leistungsfähigeren elektromagnetischen Schwingungserreger verwenden oder aber einen mechanischen Vibrator, der von einem regelbaren Motor angetrieben wird. Wenn die erzwungenen Schwingungsausschläge am Prüfling ihr Maximum erreichen, stimmt die sekundliche Drehzahl des Motors mit der Eigenfrequenz des Prüflings überein.

Voraussetzung für die Richtigkeit der Messungen der Eigenfrequenz ist, daß dieselbe durch das Ansetzen des Schwingungserregers oder des Schwingungsmessers nicht wesentlich beeinflußt wird, d. h., daß die Steifigkeit und Masse des Schwingungsgebers oder -empfängers klein im Verhältnis zu den entsprechenden Werten des Prüflings sind.

Auf die einzelnen, für Schwingungsmessungen verwendeten Meßverfahren näher einzugehen, würde im Rahmen dieser Abhandlung zu weit führen. Für den Interessierten steht hierfür eine reichhaltige Literatur zur Verfügung. Der Schwingungsmeßtechniker muß allerdings über die möglichen Meßverfahren orientiert sein, damit er, dem jeweiligen Zweck angepaßt, das richtige Verfahren anwendet [9].

So war [illegible] ssungen an Maschine [illegible] rte elektrische Meßapparatur auf [illegible] Gerät, wie der *Tastograph*, am Platz. [illegible] Meßverfahren handelt es sich um mechanisch-elektrische bzw. um rein elektrische. In verschieden ausgeführten Wandlern werden die Änderungen der mechanischen Werte, Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Dehnung in entsprechende Änderungen elektrischer Werte wie Widerstand, Selbstinduktion, Kapazität, induzierte Spannung umgewandelt [10]. Kapazitive Wandler werden nur selten verwendet, da hierbei noch besondere experimentelle Schwierigkeiten auftreten. Am häufigsten sind wohl heute induktive und piezoelektrische Wandler [11] bzw. die Widerstandsmeßstreifen in Gebrauch [12].

Die induktiven Wandler, die elektrisch im Zweig einer Wechselstrombrücke liegen, haben den Vorteil, daß sie im allgemeinen aufgespannt werden, also immer wieder verwendbar und gut eichbar sind. Da sie mit Trägerfrequenz arbeiten, sind sie statisch und dynamisch mit gleicher Empfindlichkeit verwendbar. Die piezoelektrischen Wandler werden hauptsächlich für Druck-, Kraft- und Beschleunigungsmessungen bei hohen Frequenzen in Verbindung mit einem Elektronenstrahloszillograph angewendet.

Die Widerstandsmeßstreifen, bei denen der Effekt ausgenutzt wird, daß sich der Widerstand eines Leiters bei mechanischer Längung oder Kürzung ändert, werden aufgeklebt, können also nur einmal verwendet und vorher nicht geeicht werden. Dafür haben sie den Vorteil einer verschwindend kleinen Masse, und sie können auch an nach der Montage unzugänglichen Stellen vor dem Zusammenbau angebracht werden. Es läßt sich schon eine solche Gleichmäßigkeit der Geber erreichen, daß man mit genügender Genauigkeit eine Gruppeneichung vornehmen kann und diese Eichung dann allen Messungen mit Gebern dieser Gruppe zugrunde gelegt wird. Auch diese Wandler können im Trägerfrequenzverfahren arbeiten und sind dann für statische und dynamische Messungen brauchbar. Die Widerstandsmeßstreifen arbeiten fast trägheitslos bis zu sehr hohen Frequenzen und sind deshalb auch besonders zur Messung stoßartiger Vorgänge geeignet.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, daß man sich *vor* einer Messung darüber klar sein muß, ob der betreffende Wandler und die Registrierapparatur hinsichtlich der zu erwartenden Frequenzen und Amplituden geeignet sind.

Für die Geräuschmessung dient ein Schallstärkemeßgerät. Diese Messungen machen insofern Schwierigkeiten, als ein spezieller Raum, von anderen Schalleinflüssen frei, hierfür vorhanden sein muß. Wird die Apparatur zur Messung des Schalldruckes noch durch ein Tonfrequenzspektrometer ergänzt, das eine Analyse der auftretenden Schwingfrequenzen durchführt, so kann man auch wichtige Rückschlüsse auf die Schallquelle und evtl. Fehler ziehen.

6. Maßnahmen zur Schwingungsentstörung

Sowohl vorbeugend als auch nach dem Eintritt von Schwingungsschäden müssen Maßnahmen getroffen werden, die Schwingungen auf ein den verschiedenen Anforderungen entsprechendes Maß herabzudrücken. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten. Hat die Rechnung oder eine Messung ergeben, daß innerhalb des Regelbereiches der Maschine Resonanzschwingungen an einem Maschinenteil auftreten, so kann

1. die Eigenfrequenz des Schwingsystems geändert werden,
2. die Erregerfrequenz geändert werden,
3. die Amplitude der erregenden Kraft herabgesetzt werden,
4. eine zusätzliche Dämpfung angebracht werden.

Der sicherste Weg wird die Verstimmung der Eigenfrequenz bzw. der Erregerfrequenz sein. Hierfür ein Beispiel:

Ein Lüfterrad sei mit Schaufeln bestückt, die eine niedrigste Eigenfrequenz von 200 Hz haben. Die Arbeitsdrehzahl sei 3000 U/min. Sind jetzt über den Umfang gleichmäßig verteilt beispielsweise vier Strömungsunregelmäßigkeiten vorhanden — das kann sein durch dem Lüfterrad vor- oder nachgestellte vier Rippen, vier Hauptdurchlaßkanäle für die Luft oder vier Leitschaufeln —, so erhält jede Schaufel bei einer Umdrehung vier Impulse, d. h. also in der Sekunde

$$\frac{4 \cdot 3000}{60} = 200 \text{ Impulse.}$$

Die Schaufeln werden in Resonanz schwingen, was dann u. U. zu Brüchen führen kann. Man kann nun entweder durch Änderung der Form oder der Abmessungen der Schaufeln die Eigenfrequenz derselben verändern, in dem genannten Beispiel nach Möglichkeit erhöhen, damit die Erregerfrequenz die Eigenfrequenz in keinem Fall erreicht. Man könnte aber auch die Erregerfrequenz ändern, indem man die Zahl der Strömungshindernisse über den Umfang von vier auf fünf erhöht. Dann würde die Resonanzdrehzahl bei 2400 U/min liegen, so daß bei einer Arbeitsdrehzahl von 3000 U/min nur noch ungefährliche Schwingungen auftreten werden. Welcher dieser beiden Wege der jeweils erfolgreichere und billigere ist, muß von Fall zu Fall entschieden werden.

Die Möglichkeit der Herabsetzung der Amplitude der erregenden Kraft ist bei drehenden Teilen durch eine sorgfältige, dynamische Wuchtung gegeben [6]. Den Idealzustand stellt ein 100 %iger Massenausgleich in jeder Querschnittsebene des Läufers dar. Dies läßt sich jedoch sowohl hinsichtlich eines Ausgleiches in *jeder* Ebene als auch hinsichtlich des 100 %igen Ausgleiches innerhalb einer Ebene nicht erreichen. Man begnügt sich deshalb in den meisten Fällen mit einer dynamischen Wuchtung in bezug auf die beiden Lagerebenen, wobei u. U. noch Biegemomente im Läufer auftreten können. Die Genauigkeit der Wuchtung soll natürlich so weit wie möglich getrieben werden, die Kosten steigen aber mit der Genauigkeit stark an. Man muß sich deshalb auch vor überspitzten Anforderungen an die Genauigkeit hüten, wenn man nämlich die Änderungen der Unwucht bedenkt, die im Betrieb durch Wärmeverzug, Verlagerung von Wicklungen oder durch den Lagereinfluß entstehen können. Aus der Überlegung und Erfahrung heraus müssen hier vernünftige Richtwerte für die in den einzelnen Fällen noch zulässigen Unwuchten aufgestellt werden [13].

Sind Elektromaschinen mit anderen Maschinen gekoppelt, die einen hohen Ungleichförmigkeitsgrad haben, so können zum Schutz der Elektromaschinen vor diesen Schwankungen Schwungscheiben angebracht werden. Diese Schwungscheiben sollen den Ungleichförmigkeitsgrad $\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{mittel}}$ der ungleichförmig arbeitenden Maschine herabsetzen. Für elektrische Schiffsantriebe soll er beispielsweise nach dem Seeregister der UdSSR nicht mehr als $^1/_{125}$ betragen. Eine solche Schwungscheibe wirkt aber nicht bzw. müßte unverhältnismäßig schwer gemacht

werden, wenn die [illegible] des Gesamtschwingungssystems [illegible]

Einen guten Schutz [illegible] die heute vielfach verwendeten torsionselastischen Kupplungen [illegible] Übertragung des mittleren Drehmomentes gewährleisten, aber zusätzlich begrenzte gegenseitige Verdrehungen der gekuppelten Achsen mit im Verhältnis zum Nutzmoment kleinen Zusatzdrehmomenten zulassen. Außerdem besitzen solche Kupplungen oft auch eine gewisse Biegeweichheit, so daß die für einen schwingungsfreien Lauf der Maschine notwendige Fluchtung der Achsen erleichtert wird. Da aber auch gewisse Nachteile mit solchen Kupplungen verbunden sind, wie z. B. die Neigung zum Auftreten von Pendelungen beim Antrieb von Generatoren, kuppelt man die Generatoren auch oft starr und führt sie als Einlagergeneratoren aus [13]. Damit ergeben sich besser übersehbare Lagerbedingungen, eine kürzere Baulänge und die Durchführbarkeit einer genaueren Schwingungsrechnung.

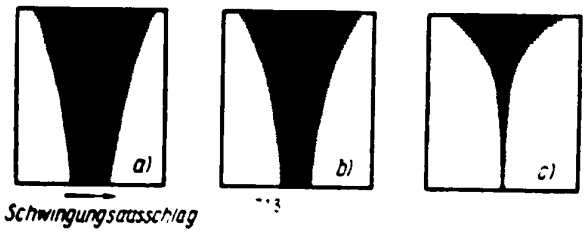


Bild 3. Dämpfung von Stahl und Grauguß bei Verdreh-Ausschwingversuchen [14]
a) weicher Stahl; b) Grauguß mit Kugelgraphit; c) gewöhnlicher Grauguß

Eine nicht unwesentliche Maßnahme zur Schwingungsentstörung ist eine gut ausgeführte Maschinengründung, die zwar nicht immer die von der Maschine hervorgerufenen Schwingungen innerhalb der Maschine selber herabsetzt, die aber diese Schwingungen vom Bauuntergrund fernhält. Die einzelnen Maschinen müssen auf einen genügend steifen Rahmen gemeinsam montiert werden, um Schiefstellungen der Achsen gegeneinander zu verhindern. Dies gilt ganz besonders für Schiffsmaschinen. Bevor das Aggregat auf dem Schiff montiert wird, sollte durch Probeläufe an Land das Schwingungsverhalten des Aggregates überprüft werden.

Zum Schutz von Maschinen und Geräten vor den von anderen Maschinen ausgehenden Schwingungen wird die federnde Aufhängung verwendet.

Oft werden große Erwartungen in die Dämpfung der Schwingungen durch die Werkstoffdämpfung geeigneter Werkstoffe gesetzt [14]. Es soll an dieser Stelle aber davor gewarnt werden, der Werkstoffdämpfung allzu große Bedeutung beizumessen. Ihr Anteil an der Gesamtdämpfung ist meist nur gering. Es ist vielleicht bekannt, daß Gußeisen im Vergleich zu Stahl eine wesentlich höhere Dämpfung hat. Dies wird in Bild 3 gezeigt [14], wo das Abklingen der Eigenschwingung eines Stabes aus Stahl und zweier Stäbe aus Gußeisen verglichen wird. Die größere Dämpfung des Gußeisens fällt aber nur dann ins Gewicht, wenn die Beanspruchung nicht weit unter der Dauerfestigkeit des Werkstoffes liegt. Um die Dämpfung ausnutzen zu können, müßte man also eine möglichst große Volumenmenge des Konstruktionsteiles dynamisch hoch beanspruchen, was sich jedoch nur in seltenen Fällen erreichen läßt.

Eine vollkommene Schwingungsentstörung wird sich nie erreichen lassen. Es bleibt die Frage offen, welche restlichen Schwingstärken man zulassen darf. Hierfür sind verschiedene Auswirkungen der Schwingungen maßgebend, wie Festigkeitsverhalten, Schallabstrahlung, direkte Einwirkung der Schwingungen auf den Menschen. Einheitliche Richtlinien über die Art der Angabe der Schwingstärke wie auch über zulässige Werte existieren noch nicht. Im Flugmotorenbau ist beispielsweise eine maximal zulässige *Beschleunigungs*amplitude von ± 2 g unabhängig von der Drehzahl gebräuchlich. Im Hinblick auf die Laufruhe von Turbogeneratoren werden als Grenzwerte bestimmte *Weg*amplituden unabhängig von

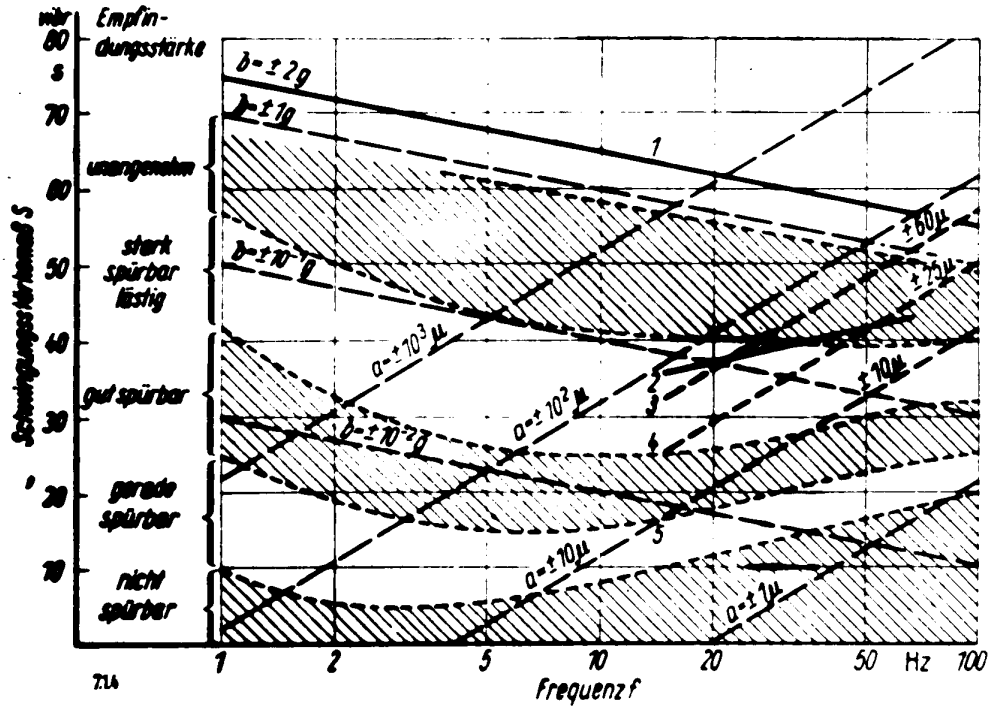


Bild 4. Richtlinien für zulässige Schwingstärken

1 Flugmotoren; max. zulässige Beschleunigungsamplitude $\pm$ 2 g; *2* Elektrische Schiffsmaschinen; max. zulässige Schwingstärken nach dem Seeregister der UdSSR. *3* bis *5* Turboaggregate; Beurteilung der Laufruhe nach Schwingwegen [15]; *5* < $\pm$ 10 μ: sehr gut; *4* $\pm$ 10 μ bis $\pm$ 25 μ: noch gut; *3* $\pm$ 25 μ bis $\pm$ 60 μ: noch tragbar, verbesserungsfähig; > $\pm$ 60 μ: nicht tragbar

der Drehzahl angegeben [15]. Das Seeregister der UdSSR (§ 98) gibt für zulässige Schwingungen von elektrischen Schiffsmaschinen drehzahlabhängige Wegamplituden an. Ein Vergleich dieser Werte ist erst nach Umrechnung möglich.

Es wird nun hier der Vorschlag gemacht, das in Bild 4 gezeigte Diagramm zum anschaulichen Vergleich der in den einzelnen Fällen zugelassenen Schwingstärken untereinander zu benutzen. In dem Diagramm ist als Abszisse logarithmisch die Schwingfrequenz f, als Ordinate linear das Schwingstärkemaß S in vibrar aufgetragen [16]. Dieses Schwingstärkemaß geht zurück auf die Schwingungsleistung, bezogen auf eine Viertelperiode,

$$L = \frac{m}{2\pi^2} \cdot \frac{b^2}{f} = 8\pi^2 m a^2 f^3,$$

wobei f die Schwingfrequenz, b die Beschleunigungs- und a die Wegamplitude der schwingenden Masse m ist. Der Faktor $\varkappa = \frac{b^2}{f}$ wird als Schwingstärke bezeichnet und hierauf, ähnlich wie bei der Schallstärke, ein logarithmisches Schwingstärkemaß aufgebaut.

$$S = 10 \lg \varkappa / \varkappa_s .$$

Hierbei ist der Bezugswert $\varkappa_s$ zu $\varkappa_s = 0{,}1\ \mathrm{cm}^2/\mathrm{s}^3$ festgelegt worden. Die Einheit des Schwingstärkemaßes wird mit „vibrar" bezeichnet. Nimmt das Schwingstärkemaß S um ein vibr zu, so vergrößert sich die Schwingstärke $\varkappa$ auf $\sqrt[10]{10} \cdot \varkappa = 1{,}26\,\varkappa$.

In einem solchen Diagramm ergibt sich die Abhängigkeit des Schwingstärkemaßes S von der Frequenz f sowohl bei konstanter Beschleunigungs- b wie auch bei konstanter Wegamplitude a als je eine Geradenschar, wie sie dort eingezeichnet sind. Die vorher angegebenen Richtwerte für Flugmotoren, Turboaggregate, Schiffsmaschinen lassen sich jetzt ohne Schwierigkeit hier eintragen und vergleichen. Außerdem sind noch die aus zahlreichen Versuchen ermittelten Bereiche gleicher Schwingempfindung [17] angegeben. Um ein Gefühl für die Gefährlichkeit der Wirkung derartiger Schwingungen auf Bauwerke zu bekommen, sind in der Tafel 1 die an Bauwerken beobachteten Schäden in Abhängigkeit vom Schwingstärkemaß aufgeführt [16].

Tafel 1. Wirkung von Schwingungen auf Bauwerke [16]

Schwingstärkemaß in vibr	Auswirkung auf Bauwerke
10—20	leichte Erschütterungen; noch keine Gebäudeschäden
20—30	mittelstarke Erschütterungen; noch keine Gebäudeschäden
30—40	starke Erschütterungen; leichte Gebäudeschäden (Verputzrisse, Risse in leichten Mauern)
40—50	schwere Erschütterungen; schwere Gebäudeschäden (Risse in tragenden Mauern)
50—60	sehr schwere Erschütterungen; Gebäudezerstörungen.

Von den angeführten Beispielen werden also im Flugmotorenbau die relativ stärksten Schwingungen zugelassen. Aber bei allen Beispielen werden die zugelassenen Schwingstärken empfindungsmäßig schon als lästig empfunden und erfordern eine Isolierung der Maschinen von den Bauwerken, um diese vor Schäden zu schützen.

Die Ausarbeitung von weiteren Richtlinien, z. B. für Elektromotoren an Werkzeugmaschinen, wäre wünschenswert. Auch eine Festlegung zulässiger Geräuschstärken von Elektromaschinen für bestimmte Zwecke müßte vorgenommen werden. Diesbezüglich wurde bisher nur eine Angabe im Seeregister der UdSSR (§ 912) gefunden, wonach der von einem Elektromotor erzeugte Lärm in 1 m Entfernung von der Maschine 90 dB nicht übersteigen soll.

7. Bauteilfestigkeit

Wenn im vorhergehenden von der Berechnung, Messung und Entstörung von Schwingungen die Rede war, so soll jetzt noch auf das hiermit eng zusammenhängende Gebiet der Bauteilfestigkeitsuntersuchungen hingewiesen werden. Ist im Betrieb ein Schwingungsbruch aufgetreten, so ist hierfür oft auch eine aus konstruktiven, werkstofflichen oder technologischen Gründen nicht ausreichende Dauerhaltbarkeit des betreffenden Bauteiles mitverantwortlich. Durch Dauerversuche an ganzen Bauteilen müssen deshalb solche Einflüsse untersucht und Maßnahmen zur Verbesserung der Dauerhaltbarkeit gefunden werden. Gerade weil Lage und Aussehen der Schwingungsbrüche dem Erfahrenen Hinweise auf die vermutlich aufgetretene Schwingung geben können und andererseits im voraus zu erwartende Schwingungsbeanspruchungen bestimmte Anforderungen an die Gestaltfestigkeit der Bauteile stellen, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen diesen beiden Sachgebieten erforderlich. Ein näheres Eingehen auf die Methoden der Bauteilfestigkeitsprüfung würde in diesem Rahmen zu weit führen.

Abschließend sei noch auf die Notwendigkeit einer sorgfältig geführten Schadensstatistik hingewiesen. In dieser Statistik, die alle im Elektromaschinenbau aufgetretenen Schwingungsschäden umfassen soll, sind Art und Umfang des Schadens, zur Klärung durchgeführte Untersuchungen und die ermittelte Ursache sowie die Maßnahmen zur Verhinderung gleichartiger Schäden aufzuführen. Die Auswertung dieser Statistik kann sowohl für Neukonstruktionen wertvolle Hinweise geben als auch zur Sicherung bzw. Steigerung der Güte ausgeführter Konstruktionen beitragen.

8. Zusammenfassung

Die vorstehenden Ausführungen sollten dem Elektroingenieur zeigen, daß das Problem der mechanischen Schwingungen auch im Elektromaschinenbau mehr und mehr an Bedeutung gewinnt. Zwar geht die Schwingungserregung in sehr vielen Fällen nicht von den Elektromaschinen, sondern von den damit gekoppelten Maschinen aus. Es besteht aber die Gefahr, daß, wenn sich der Elektroingenieur nicht auch um diese Probleme kümmert, die Schuld an aufgetretenen Schwingungsschäden, wenn auch oft ungerechtfertigt, auf der Seite der Elektromaschine gesucht wird.

Es wurden einige im Elektromaschinenbau auftretende Fragen besprochen und die zur Klärung erforderlichen Untersuchungen und Meßeinrichtungen sowie Maßnahmen zur Schwingungsentstörung angegeben. Auf die notwendige Normung der zulässigen Schwing- und Geräuschstärken wurde hingewiesen.

Eine Ergänzung der Schwingungsuntersuchungen durch Bauteil-Festigkeitsuntersuchungen wird zusammen mit einer sorgfältigen Analyse aufgetretener Schwingungsschäden mit zur Qualitätssteigerung an Elektromaschinen beitragen.

Literatur

[1] *Jordan, H.:* Über einen Fall von rheolinearen Schwingungen bei unsymmetrischen Gleichlaufschaltungen mit Asynchronmotoren. Z. f. Elektrotechnik Bd. 2 (1949) S. 114/16.

[2] *Jordan, H.:* Der geräuscharme Motor. Verlag W. Girardet Essen 1950.

[3] *Rausch, E.:* Maschinenfundamente. Bd. I. 3. VDI-Verlag Berlin 1943.
Rausch, E.: Maschinenfundamente. Z. d. VDI Bd. 95 (1953) H. 28.

[4] *Fiesinger:* Entwurf, Berechnung und Bauausführung von schwingungsbeanspruchten Dieselmotorenfundamenten. Bautechnik Bd. 30 (1953) H. 5.
Sauer: Turbosätze auf Stahlkonstruktionen. Elektrizitätswirtschaft Bd. 52 (1953) H. 10.

[5] *Haug, K.:* Drehschwingungen in Kolbenmaschinen. Springer Verlag Berlin-Göttingen, Heidelberg 1952.
Weber, C.: Schwingungen im Maschinenbau. Deutscher Ing.-Verlag Düsseldorf 1953.
Söchting, F.: Berechnung mechanischer Schwingungen. Springer Verlag Wien 1951.

[6] *Federn, K.:* Neue Entwicklungen im Auswuchtmaschinenbau. Z. d. VDI Bd. 92 (1950) H. 25.
Wilhelmi, H.: Dynamische Wuchtmaschine AM 1 von Askania. Feingerätetechnik 3. Jg. (1954) H. 5.

[7] *Jordan, H.* und *Rothert, G.:* Magnetische Geräusche von Drehstrom-Asynchronmotoren. ETZ Bd. 74 (1953) H. 22.
Jordan, H. und *Rothert, G.:* Vorausberechnung des magnetischen Geräusches von Schleifringläufermotoren. ETZ Bd. 75 (1954) S. 519.
Benz, F.: Meßtechnik für Funkingenieure. Springer Verlag Wien (1952) S. 245/52.

[8] *Otto, A.:* Hilfstafeln zur Ermittlung von Schwungmomenten. Maschinenbautechnik 3. Jg. (1954) H. 3.

[9] *Fink, K.:* Zweckmäßige Auswahl von Dehnungsmeßverfahren. Z. d. VDI Bd. 94 (1952) H. 32.
Oesterlin, W.: Methoden zur Schwingungsmessung an Turbinen und Motoren. Industrie-Anzeiger, Essen. Werkzeugmaschine und Fertigungstechnik Nr. 45 5. 6. 1953.

[10] *Pflier, P. M.:* Elektrische Messung mechanischer Größen. 3. Aufl. Springer Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg 1948.

[11] *Berlit, G.:* Das piezoelektrische Meßverfahren. Z. d. VDI Bd. 92 (1950) H. 4 und 10.

[12] *Fink, K.:* Grundlagen und Anwendungen des Dehnungsmeßstreifens. Verlag Stahleisen Düsseldorf 1952.

[13] *Burkhardt:* Neuere Erkenntnisse der Elektrotechnik; 5. Jahrestagung der Elektrotechniker Weimar 1954. Verlag Technik, Berlin 1954.

[14] *Hartmann, W.:* Der gegossene Werkstoff in der Konstruktion. Z. d. VDI Bd. 94 (1952) H. 3.

[15] *Kuschewitz, G.:* Laufruhe von Turboaggregaten. Energietechnik 3. Jg. (1953) H. 2.

[16] *Koch, H. W.:* Ermittlung der Wirkung von Bauwerkschwingungen. Z. d. VDI Bd. 95 (1953) H. 21.

[17] *Meister, F. J.:* Empfindungsskala f. mechan. Schwingungen. Akustik Bd. 2 (1937) S. 1 10.

Diskussion

Dr. *Stumpp*, Dessau

1. Technische Bedingungen für elastische Kupplungen

Der Vortragende hat selbst darauf hingewiesen, daß das akute Problem der mechanischen Schwingungen zum guten Teil aus der immer vielfältiger werdenden Kooperation von Kraft- und Arbeitsmaschinen des Maschinenbaues mit Elektromaschinen resultiert. Inwiefern schon die kuppelnden Elemente eines solchen Aggregats Erreger von Schwingungen werden können, habe ich auf der Weimartagung 1952 vorgetragen. Es hat an Bestätigungen dieser Erkenntnisse nicht gefehlt. Was mir aber bis heute zu fehlen scheint, ist auf der Seite des Maschinenbaues die Bereitschaft, wenigstens darüber zu diskutieren, ob man elastische Kupplungen nicht präziser bauen kann.

Einer Kommission, die die Aufgabe der Standardisierung elastischer Kupplungen im Jahre 1954 bearbeitete, habe ich für elastische Klauenkupplungen mit radial gestellten Leder- oder Gummiklötzen folgenden Teilgenauigkeitsvorschlag gemacht (es werden die zulässigen Abweichungen Δt vom Sollmaß der Teilung des Klaueneingriffsdurchmessers angegeben):

Kupplungsdurchmesser [mm]	Δt [mm]
≦ 150	± 0,1
151 bis 250	± 0,2
251 bis 350	± 0,3
351 bis 600	± 0,4
> 600	± 0,5

Dem Vorschlag liegt zugrunde, bei Kupplungen mit 0,8 bis 1,5° Drehfederung beim maximal zulässigen Moment die Kurbelkraft nicht größer als 10% der betriebsmäßigen Umfangskraft werden zu lassen.

Die Forderungen mögen hart, vielleicht unerfüllbar sein, aber eine Antwort darauf sollte der Maschinenbau mindestens geben.

2. Die Methode der Berechnung der kritischen Drehzahl für Biegeschwingungen

Dieses Forum und dieser Vortrag scheinen mir weiter geeignet die Fachkollegen auf die Bedenklichkeit der vielfach noch geübten Berechnungsmethoden der kritischen Drehzahl für Biegeschwingungen nach der Formel

$$n_k = \frac{300}{\sqrt{f_{max}}} \qquad (1)$$

aufmerksam zu machen. Man hat seit der in ETZ 45. Jahrg. (1924), S. 1205, erfolgten Veröffentlichung von *E. Laßwitz* gelernt, daß f_{max} mit *allen* auf die Welle einwirkenden Lasten und Kräften ermittelt werden muß. Auch *H. Trenkmann* gibt es in seinem 1954 im Fachbuchverlag Leipzig erschienenen Buche „Theorie, Konstruktion und Berechnung der Gleichstrommaschinen" wieder so an (Berechnungs-

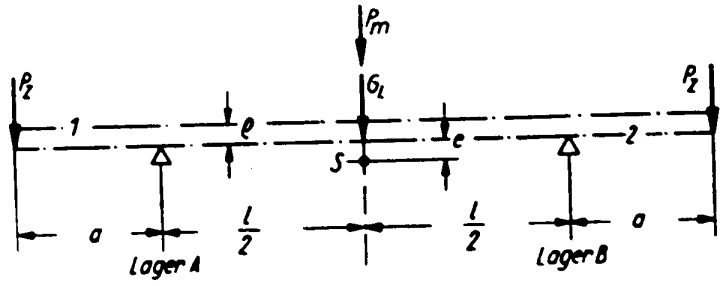
beispiel S. 244 [illegible] auch ich noch nach dieser bedenklichen M[illegible]

Es läßt sich aber nachweisen, daß folgende möglicherweise auf die Welle einer elektrischen Maschine einwirkenden Kräfte nicht in Anrechnung gebracht werden dürfen:

der Riemenzug am Wellenende oder irgendein Äquivalent desselben (Zahndruck u. ä.);

ein magnetischer Zug, der hervorgerufen würde durch denjenigen Teilbetrag ϱ der Exzentrizität der Läufer- zur Ständerachse, der von Fertigungsungenauigkeiten und Passungsspielen verursacht ist.

Der Nachweis kann für den Fall, daß eine Läuferwelle nach nachstehendem Bild als masselose Feder mit einer mittigen Punktmasse $m = G_L/g$ aufgefaßt werden kann (G_L = Läufergewicht), sehr anschaulich geführt werden. Im Bild ist die Lasten-



und Kräfteanordnung an der Läuferwelle einer elektrischen Maschine mit zwei durch Riemenzug oder ähnlich belasteten Wellenenden gezeichnet und hierbei angedeutet, daß der Läufer auch ohne die Wellendurchbiegung unter der Wirkung der Lasten (Läufergewicht G_L) und Kräfte (magnetischer Zug P_m und Riemenzug P_z) infolge von Passungsspielen bzw. Fertigungsungenauigkeiten um den Betrag ϱ außermittig im Maschinenständer liegend angenommen wird.

Das Kräftegleichgewicht an der *Schwingungsform* der sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω drehenden Welle im Amplitudenzeitpunkt bei einer Schwerpunktsverlagerung e befolgt die Gleichung

$$G_L \mp 6a/l\, P_z + P_m \frac{\varrho + f_{max} + w}{\varrho + f_{max}} + \frac{G_L}{g}\,\omega^2(w \pm e) = \frac{48\,EJ}{l^3}(f_{max} + w)\,; \qquad (2)$$

w Amplitude der Biegeschwingung; J äquatoriales Trägheitsmoment des Wellenquerschnitts; E Elastizitätsmaß des Wellenwerkstoffs, die übrigen Zeichen im Bild bzw. Text erklärt. Daraus folgt mit

$$G_L - P_m \mp 6a/l\, P_z = \frac{48\,EJ}{l^3}\, f_{max}\,. \qquad (3)$$

$$\frac{P_m}{\varrho + f_{max}} = c_m\,, \qquad (4)$$

$$\frac{48\,EJ}{l^3} = c\,, \qquad (5)$$

für die Schwingungsweite die Gleichung

$$\frac{\pm G_L/g\ \omega^2 e}{c - c_m - G_L/g\ \omega^2} = w \tag{6}$$

und durch Nullsetzen des Nenners die kritische Drehzahl

$$n_k = 300 \sqrt{\frac{c - c_m}{G_L}}. \tag{7}$$

In Gl. (7) repräsentiert also $G_L/(c - c_m)$ das in Gl. (1) einzusetzende f_{max}. Nach Gl. (3) beträgt aber das mit allen statischen Lasten und Kräften resultierende, nach unausrottbarer Tradition noch vielfach eingesetzte f_{max}:

$$f_{max} = \frac{G_L + \varrho\, c_m \mp 6\, a/l\, P_s}{c - c_m}. \tag{8}$$

Dessau, 15. Juni 1955.

[illegible]

[illegible] Schmetz, Berlin

[illegible] Bedingungen für elastische Kupplungen

[illegible] mir sind Fälle bekannt, wo elastische Kupplungen schwingungserregend [illegible] haben. Neben ungenügender Auswuchtung und unsauberer Ausrichtung [illegible] als Ursache hierfür besonders die im Diskussionsbeitrag erwähnte Teil[illegible] eine Rolle. Es wäre also tatsächlich zu begrüßen, wenn sich der Ma[illegible] zu dem von Herrn Dr. *Stumpp* gemachten Teilgenauigkeitsvorschlag [illegible] würde.

[illegible] Methode der Berechnung der kritischen Drehzahl für Biege[illegible]

[illegible] der Forderung von Herrn Dr. *Stumpp* stimme ich vollkommen überein, daß [illegible] ein Riemenzug bzw. Zahndruck am Wellenende sowie ein magnetischer [illegible] hervorgerufen durch eine Exzentrizität der Läufer- zur Ständerachse infolge [illegible] und Passungsspielen bei der Berechnung der kritischen [illegible] nicht berücksichtigt werden dürfen. Man muß sich hierzu nochmals die [illegible] der allgemein verwendeten Formel

$$n_k = \frac{300}{\sqrt{f_{max}}} \tag{1}$$

[illegible]. Der Ausgangspunkt ist die Eigenfrequenz

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad \text{bzw.} \quad n = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{c}{m}} \ [1/\text{min}] \tag{2}$$

[illegible]schwingungssystems mit der Masse m und der Federsteifigkeit c. Durch Ein[illegible] von $m = G/g$ und $G/c = f_{max}$ entsteht die Formel für n_k. Bei der Anwen[illegible] der Formel für n_k wird aber dann übersehen, daß ja m eine von den auf sie ein-

wirkenden Kräften, wie Schwerkraft, magnetische Kräfte usw., unabhängige Größe hat. Es darf also für G nur das reine Gewicht der schwingenden Masse eingesetzt werden.

Eine weitere Frage, die mir in dem Diskussionsbeitrag noch nicht klar genug erläutert scheint, ist die, welche Einflüsse auf die Federsteifigkeit bestehen. Hier muß man unterscheiden zwischen Kraftwirkungen, die im Raum stillstehen, und solchen, die mit dem Läufer umlaufen. Zu den im Raum stillstehenden gehören:

a) die Schwerkraftwirkung auf den Läufer,
b) Riemenzug oder Zahndruck am Wellenende,
c) magnetische Zugkräfte infolge Unsymmetrie im Ständer.

All diese Kräfte bewirken zwar eine im Raum stillstehende Durchbiegung der Welle und Lagerbelastung entsprechend ihrer Kraftrichtung, sie beeinflussen aber die Eigenfrequenz nicht. Die Kräfte lassen sich vektoriell zu einer im Raum stillstehenden Kraft zusammenfassen, in deren Richtung dann die Durchbiegung der Welle und die Lagerkraft liegt. Einen Einfluß auf die Größe der Schwingungsamplituden haben diese Kräfte ebenfalls nicht.

Zu den mit dem Läufer umlaufenden Kräften gehören:

d) die Fliehkraft infolge einer Exzentrizität des Schwerpunktes,
e) magnetische Zugkräfte infolge Unsymmetrien im Läufer.

Diese Kräfte haben zwar bestimmenden Einfluß auf die Größe der umlaufenden Durchbiegung (Schwingungsamplitude), jedoch ebenfalls keinen Einfluß auf die Eigenfrequenz.

Die umlaufende Durchbiegung wird begrenzt durch:

f) die mechanisch-elastische Rückstellkraft der Welle c_{el},
g) die infolge der Durchbiegung auftretende magnetische Rückstellkraft c_m, die negativ anzusetzen ist, da sie der mechanischen entgegenwirkt.

Ausgehend von der Gl. (2) kommt man also zu dem Ergebnis

$$n_k = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{c}{m}} = \frac{30\sqrt{g}}{\pi}\sqrt{\frac{c_{el}-c_m}{G_L}} = 300\sqrt{\frac{c_{el}-c_m}{G_L}}\ [1/\mathrm{min}], \qquad (3)$$

wenn c_{el} und c_m in kg/cm und G_L in kg eingesetzt werden.

7.2 Welche neueren Erkenntnisse der Dauerfestigkeitslehre lassen sich auf den Elektromaschinenbau übertragen?

Dr.-Ing. *H. Lorenz*, Berlin

Die großen Fortschritte auf dem Gebiet der werkstoff- und gestaltungsgerechten Konstruktionen im Maschinenbau, und besonders im Flugmotorenbau, stellen auch den Elektroingenieur vor die Frage, inwieweit sich die gewonnenen Forschungsergebnisse auf dem Gebiet des Leichtbaues ohne Gefährdung der Betriebssicherheit auf den Elektromaschinenbau übertragen lassen.

Bis vor etwa 30 Jahren wurde die Zugfestigkeit fast allgemein als Grundlage verwendet, um unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors die zulässige Belastung eines Werkstoffes in einer Maschine zu bestimmen. Da aber in vielen Fällen der Maschinenteil durch bleibende Verformungen unbrauchbar wird, ging man dann über, die Streckgrenze als Berechnungsgrundlage für den Fall rein statischer Beanspruchung zu wählen, und zwar wieder unter Zuhilfenahme eines Sicherheitsfaktors. Der Spannungsbereich zwischen Streckgrenze und Zugfestigkeit bietet dabei eine zusätzliche Sicherheit gegen die Zerstörung des Teiles.

Für die Beurteilung des Betriebsverhaltens der Werkstoffe auf Grund der im Zugversuch an einem glatten Probestab erhaltenen Werte muß aber berücksichtigt werden, daß bei den meisten Maschinenteilen an Verbindungen und Querschnittsübergängen mehrachsige Spannungszustände auftreten.

Werkstoff, der beim normalen Zugversuch ein einwandfreies Formänderungsvermögen mit ausreichender Bruchdehnung und Einschnürung besitzt, kann im Betrieb unter Umständen ein sehr vermindertes Formänderungsvermögen aufweisen und gegebenenfalls völlig spröde brechen. Das Formänderungsvermögen wird durch alle Umstände herabgesetzt, die auf ein Erhöhen des Formänderungswiderstandes, d. h. der zum Verformen erforderlichen Zugspannungen hinwirken, wodurch der Bruch bei um so kleineren Formänderungen ausgelöst wird, je mehr die vorhandenen Zugspannungen an die Trennfestigkeit heranreichen. Das Fließen wird besonders durch Zugquerspannungen, die durch Kerbwirkung hervorgerufen werden, behindert. Ähnlich wirken Schrumpfspannungen an Schweißverbindungen.

Trotzdem ist ein gutes Formänderungsvermögen, d. h. große Bruchdehnung und Einschnürung erwünscht, da dieses bei örtlichen Beanspruchungen über die Fließgrenze hinaus eine gewisse Sicherheit gegen die Zerstörung des Werkstoffes

Der Zugversuch wird bei den Konstruktionswerkstoffen immer die Grundlage für die Abnahme zur Kontrolle der Gleichmäßigkeit sein.

Dauerbeanspruchung

Zuverlässige Aussagen auf Grund der im Zugversuch ermittelten Werkstoffwerte über das Betriebsverhalten von Maschinenteilen, insbesondere wenn diese schwingungsbeansprucht sind, lassen sich nicht machen. Von den in der Praxis auf-

[illegible] hervorgerufene [illegible] Merkmal des Dauerbruches ist, daß [illegible] selbst wenn es sich um zähe Werkstoffe handelt.

Die Beanspruchungen sind bei wechselnden Belastungen meist so klein, daß nur wenige Körner sich überelastisch verformen. In diesen Körnern finden Wechselgleitungen statt, die sich in einem abweichenden Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve bei Be- und Entlastung bzw. Lastumkehr äußern. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve hat die Form einer Hysteresisschleife, deren Flächeninhalt die Arbeit darstellt, die während des Belastungswechsels in Wärme umgesetzt wird. Die Hysteresisschleife hat bei Beginn der Wechselbelastung beim Durchlaufen der Spannung *O* eine Breite von wenigen Hundertstel Prozent und wird bei Dauerbeanspruchungen

Bild 1. Dauerbruch und Restbruch

unter der Dauerfestigkeit mit zunehmender Lastspielzahl kleiner, da der Gleitwiderstand sich erhöht und der Werkstoff sich verfestigt. Die Wechselgleitung bedingt aber eine fortschreitende Zerrüttung des Gefüges, da in einzelnen Körnern die Bindungen im Kristallgitter gelöst werden. Der Zerrüttungsvorgang wird durch Zugspannungen begünstigt, durch Druckspannungen behindert. Die Gleitzerrüttung führt an einer örtlich begrenzten Stelle von mikroskopisch kleiner Ausdehnung zum Anriß, wenn die Gleitungen groß genug sind. Bis zu einem Gleitungsbetrag, den man *Grenzgleitung* nennt, überwiegt die Verfestigung die Zerrüttung, so daß kein Bruch auftreten kann.

Bei geringem Überschreiten der Grenzgleitung durch die wechselnden Gleitungen ist das Übergewicht der schädigenden Wirkung nur gering. Das Auftreten des ersten Anrisses an Lockerstellen im Gefüge erfolgt erst nach einer größeren Anzahl wechselnder Gleitungen. Nach dem Auftreten des ersten Anrisses entsteht jedoch infolge der Kerbwirkung ein geänderter Spannungszustand mit großen Spannungserhöhungen an den Enden des Anrisses. Der Dauerbruch schreitet nun in den

Nachbarzonen schneller fort, wobei für die Geschwindigkeit des Bruchfortschrittes maßgebend ist, ob das Bauteil durch wechselnde Lasten oder wechselnde Zwangsverformungen beansprucht wird.

2. Dauerbruch

Im Gegensatz zum Gewaltbruch hat der Dauerbruch selbst immer das Aussehen eines Trennbruches, d. h., an der Dauerbruchfläche sind makroskopisch keinerlei Verformungen wahrnehmbar. Die den Dauerbruch verursachenden Gleitungen sind sehr gering und ändern dauernd ihre Richtung, so daß sich äußerlich sichtbare Verformungen nicht feststellen lassen.

Bei Zug- und Biegebeanspruchung zeigen sich bei fast allen Stählen zwei deutlich unterscheidbare Zonen auf der Bruchfläche:

1. eine glatte, zuweilen blankgescheuerte, äußerst feine Zone, der eigentliche *Dauerbruch*, und
2. eine grobe, kristalline, zerklüftete und teilweise sogar bleibend verformte Zone, der *Restbruch*.

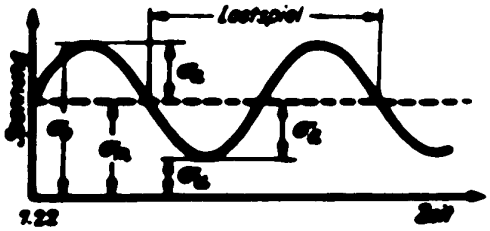


Bild 2. Dauerbeanspruchung

σ_o Oberspannung; σ_u Unterspannung; σ_m Mittelspannung; σ_a Spannungsausschlag

Die bleibenden Verformungen am Restbruch sind dadurch zu erklären, daß dieser zuletzt unter der Wirkung weniger oder sogar nur eines einzigen Lastzuges infolge hoher Überbeanspruchung entstanden ist. Die glatte Dauerbruchzone ist ein sicheres Erkennungsmerkmal, denn sie ist beim Gewaltbruch nie vorhanden.

Meist zeigt die Dauerbruchfläche infolge Beanspruchungspausen oder Änderungen des größten Spannungsausschlages noch eine jahresringartige Zeichnung, sogenannte *Rastlinien*, durch die leicht zu erkennen ist, wo der Bruch angesetzt hat und wie er fortgeschritten ist.

Beim Gußeisen als inhomogenem Werkstoff wirken die Graphitadern, die keine Zugbeanspruchung übertragen können, wie feine innere Kerben. Es entstehen an einer größeren Zahl dieser Kerben kleine Anrisse, die sich schließlich vereinigen und eine zerklüftete Dauerbruchzone ergeben. Der bedeutend glattere Restbruch hebt sich deutlich von dem hügeligen Dauerbruch ab.

Bei Verdrehbeanspruchung beginnt der Dauerbruch meist unter 45° zur Stabachse. Er verläuft dann je nach der Schubempfindlichkeit des Werkstoffes und dem Grad der Überlastung mehr nach der Faserrichtung des Werkstoffes bzw. der Achsenrichtung hin oder auch senkrecht dazu. Diese Vielgestaltigkeit ist dadurch bedingt, daß bei Verdrehbeanspruchung die größten Schubspannungen ebenso groß

wie die gr[illegible] kann viele Formen annehmen [illegible] Erfahrung.

Mikroskopisch läßt [illegible] Der Bruch transkristallin ist, d.h., er verläuft durch die Kristalle [illegible] entlang den Korngrenzen. Der Bruch geht in den meisten Fällen von der Oberfläche des Bauteiles aus, und zwar von einer Stelle, an der der normale Kraftlinienfluß der Konstruktion gestört ist. Solche Störstellen sind:

1. örtliche Fehlstellen des Werkstoffes, z. B. Randentkohlungen, Schlackenzeilen, Seigerungen, Korrosionsnarben;
2. Oberflächenverletzungen durch spanabhebende Bearbeitung, Schleifspuren, Drehriefen, Einbrandkerben bei Schweißungen;
3. konstruktiv bedingte Kerben, z. B. Ölbohrungen, Keilnuten, Wellenabsätze;
4. Kraftumlenkstellen, z. B. an Schraubenköpfen und Kröpfungen von Kurbelwellen;
5. Einspann-, Nabensitz- und Kraftangriffsstellen. Diese sind neben den konstruktiv bedingten Kerben am häufigsten die Ursache für die Entstehung von Dauerbrüchen.

Der Spannungszustand eines Maschinenteiles ist von der Art der Beanspruchung (Zug, Biegung, Verdrehung) abhängig.

In den Fällen, in denen die Normalspannung größer als die Schubspannung ist (Zug, Biegung), verläuft der Bruch im wesentlichen senkrecht zur Richtung der größten Normalspannung.

Bei Verdrehbeanspruchungen sind die Normal- und Schubspannungen gleich groß, so daß der Bruch längs, quer oder unter 45° zur Achse verlaufen kann.

Außerdem können Eigenspannungen, deren Richtung mit denen der Lastspannungen nicht übereinstimmt, einen vom normalen abweichenden Bruchverlauf hervorrufen.

8. Dauerfestigkeit

Die größte, wechselnde Beanspruchung, die eine glatte polierte Probe beliebig lange, ohne zu Bruch zu gehen, erträgt, nennt man Dauerfestigkeit.

Der Wert der Dauerfestigkeit wird als Spannung nach den üblichen Formeln der Festigkeitslehre ermittelt:

$$\sigma_{zW} = \frac{P}{F} \left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}\right] \text{ bei Zugbeanspruchung,}$$

$$\sigma_{bW} = \frac{M_b}{W_b} \left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}\right] \text{ bei Biegebeanspruchung,}$$

$$\tau_W = \frac{M_t}{W_t} \left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}\right] \text{ bei Verdrehbeanspruchung.}$$

Die Dauerbeanspruchung ist allgemein die Beanspruchung, die sich im Laufe der Zeit zwischen zwei Spannungsgrenzen ändert. Bei einer derartigen Beanspruchung kommt es weniger auf den zeitlichen Verlauf der Spannung zwischen den Grenzwerten als auf die Höhe der Grenzwerte selbst an. Idealisiert kann man den Spannungsverlauf als sinusförmig ansehen; je nach der Höhe der Mittelspannung können die Beanspruchungen

1. im Wechselbereich liegen, wobei σ_o (Oberspannung) und σ_u (Unterspannung) verschiedene Vorzeichen haben, oder
2. im Schwellbereich für Zug oder Druck liegen, wobei σ_o und σ_u gleiches Vorzeichen haben.

4. Wöhler-Kurve

Zur Ermittlung der Dauerfestigkeit nach dem Verfahren von *Wöhler* werden fünf bis sechs glatte, polierte Probestäbe benötigt. Die hinsichtlich Werkstoff, Form und Bearbeitung vollkommen gleichartigen Proben werden nacheinander in

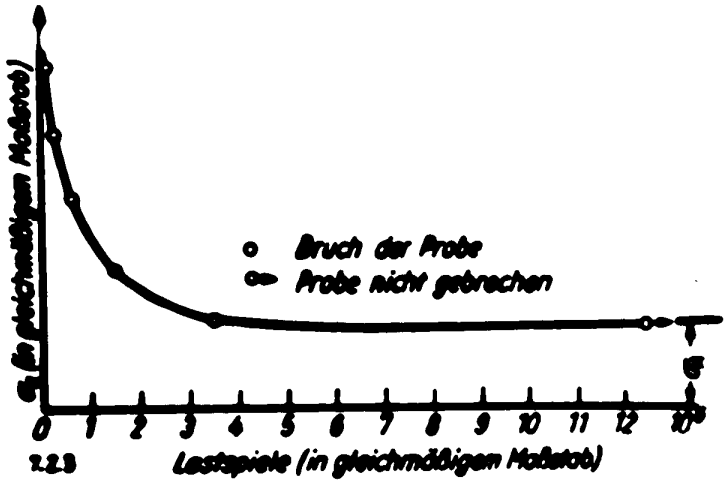


Bild 3. Wöhler-Kurve zur Bestimmung der Dauerfestigkeit

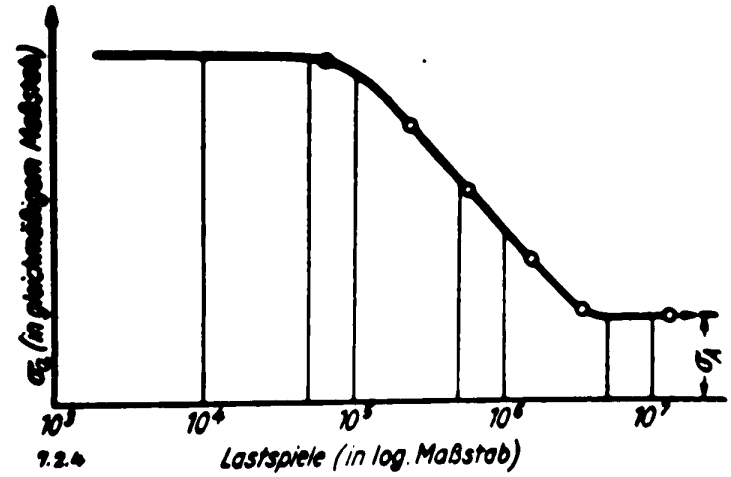


Bild 4. Wöhler-Kurve nach Bild 3 in halblogarithmischem Maßstab

einer Prüfmaschine einer schwingenden Beanspruchung unterworfen, wobei je nach der Problemstellung entweder die Mittelspannung σ_m oder die Unterspannung σ_u konstant bleibt und nur σ_o von Probe zu Probe geändert wird. Die erste Probe wird mit einem so großen Spannungsausschlag belastet, daß sie nach einer geringen Lastspielzahl sicher zu Bruch geht. Der zweite Stab wird bei geringerem Spannungs-

ausschlag belastet und wird eine größere Lastspielzahl N erreichen, usw. Die Versuchspunkte, d. h. die Spannung in Abhängigkeit von der Lastspielzahl werden im metrischen oder halblogarithmischen Koordinatensystem aufgetragen und ergeben die Wöhler-Kurve. Die Erfahrungen zeigten, daß bei einem bestimmten maximalen Spannungsausschlag oberhalb einer bestimmten Lastspielzahl bei verschiedenen Werkstoffen kein Bruch mehr eintritt, so daß die Wöhler-Kurve sich im metrischen Koordinatensystem asymptotisch einer Parallelen zur Abszisse nähert. Im halblogarithmischen Koordinatensystem ergibt der vorher hyperbelähnlich fallende Ast eine Gerade, die von einem Knickpunkt ab parallel zur Abszisse weitergeht.

Die Lastspielzahl, bei der in der halblogarithmischen Darstellung der Knick auftritt, nennt man *Grenzlastspielzahl*. Sie liegt bei Stahl zwischen $4 \cdot 10^6$ und $10 \cdot 10^6$ Lastspielen, bei Leichtmetallen zwischen $30 \cdot 10^6$ und $500 \cdot 10^6$. Es gibt auch Werkstoffe, die gar keine eigentliche Dauerfestigkeit haben, bei denen aber der Abfall der Wöhler-Kurve so gering ist, daß der für hohe Lastspielzahlen ermittelte Spannungsausschlag praktisch als Dauerfestigkeit festgelegt wird.

Ist der Spannungsausschlag größer als der zur Dauerfestigkeit gehörende, so spricht man von Zeitfestigkeit, da dann die Lebensdauer nur für eine bestimmte Zahl von Lastspielen, d. h. für eine bestimmte Zahl von Betriebsstunden ausreicht.

Die Dauerfestigkeit ist bis zu den heute üblichen Frequenzen der Prüfmaschinen bis 100 Hz frequenzunabhängig, da der Werkstoff diesen Verformungsgeschwindigkeiten noch folgen kann.

5. Dauerfestigkeitsschaubild

Die Ergebnisse der Dauerfestigkeitsversuche bei verschiedenen Mittelspannungen werden in Dauerfestigkeitsschaubildern dargestellt. In einem rechtwinkligen Koordinatensystem werden auf der Ordinate die Ober- und Unterspannungen σ_o und σ_u aufgetragen, während auf der im gleichen Maßstab gezeichneten Abszissenachse die Mittelspannungen σ_m aufgetragen werden. Die unter 45° gezeichnete Hilfslinie gibt ebenfalls die Vorspannung an.

Da Beanspruchungen oberhalb der Streckgrenze im Betrieb unzulässig große Verformungen ergeben, wird das Dauerfestigkeitsschaubild bei der im statischen Zerreißversuch gewonnenen σ_F- oder $\sigma_{0,2}$-Grenze abgebrochen. Bei zähen Werkstoffen ist nur eine geringe Abnahme des Spannungsausschlages mit zunehmender Vorspannung festzustellen. Bei spröden Werkstoffen (z. B. Gußeisen) zeigt sich ein starker Abfall des Spannungsausschlages mit steigender Zugvorspannung.

6. Näherungsverfahren

Die Feststellung der Dauerfestigkeit nach dem Wöhler-Verfahren erfordert viel Zeit. Man hat deshalb versucht, aus einer Vielzahl von Prüfungen ein festes Verhältnis zwischen den im statischen Zerreißversuch ermittelten Festigkeitseigenschaften und der Dauerfestigkeit zu finden. Es wurden z. B. für die Biegewechselfestigkeit von Stahl folgende Formeln entwickelt:

$$\sigma_{bW} = 0{,}47\,\sigma_B \pm 20\% \ [\mathrm{kg/mm^2}]$$

$$\text{oder} \quad \sigma_{bW} = 0{,}65\,\sigma_F \pm 30\% \ [\mathrm{kg/mm^2}].$$

Daraus läßt sich die Verdrehwechselfestigkeit von Stählen näherungsweise berechnen. Es ist

$$\tau_W = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{bW} \; [\mathrm{kg/mm^2}].$$

Auch die Dämpfung, die eine gewisse Abhängigkeit von der Höhe der Dauerbeanspruchung zeigt, wurde für die Dauerfestigkeitsbestimmung herangezogen. Ausreichend genaue Ergebnisse wurden aber nur in einzelnen Fällen erzielt.

7. Dauerhaltbarkeit

Außer dem Werkstoff und der Beanspruchungsart beeinflußt die Gestalt des Konstruktionsteiles und sein Einbau die Größe der Dauerhaltbarkeit; man spricht deshalb auch von der Gestaltfestigkeit. Gestalt und Einbau des Bauteiles bestimmen jedoch maßgeblich die Spannungsverteilung und die Spannungshöhe. Oft werden aber durch die auch heute noch üblichen Berechnungsverfahren die in einem Bauteil wirkenden Spannungen nicht erfaßt, da man mit stark idealisierten Annahmen rechnet.

Der Berechnung wird die an einer Stelle wirkende Kraft und die Querschnittsfläche bzw. das Moment und das Widerstandsmoment zugrunde gelegt und wie bei einem glatten Stab gerechnet. Auf die Beeinflussung des an einer Stelle herrschenden Spannungszustandes durch die Überleitung von Kräften, die durch die Bauteilform bestimmt ist, wird keine Rücksicht genommen.

Die Spannung, die aus der wirkenden Kraft und dem zur Verfügung stehenden Querschnitt berechnet wird, heißt Nennspannung.

Bei dem in Bild 6 gezeigten Zugstab mit Bohrung treten an der Bohrung Spannungsspitzen auf, die ein Vielfaches der Nennspannung betragen. Um eine Beziehung zwischen der Nennspannung und der tatsächlich auftretenden höchsten Spannungsspitze zu bekommen, wurde die Formziffer α_k eingeführt, d. h. die Zahl, mit der die Nennspannung multipliziert werden muß, um die höchste Spannung zu erhalten. Unter der Annahme der Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes ist die Formziffer bei einer bestimmten Belastung nur von der Form des Bauteiles, nicht aber vom Werkstoff selbst abhängig. Die rechnerische Erfassung der Formziffer mit Hilfe elastischer Gleichungen ist nur in einfachen Fällen möglich. Häufig werden auch spannungsoptische Untersuchungen, elektrische Modelle sowie das hydrodynamische Gleichnis oder Röntgenspannungsmessungen für die Bestimmung der Formziffer herangezogen. Die Genauigkeit ist aber nur bei bestimmten einfachen Spannungszuständen gewährleistet.

Am genauesten ist die Bestimmung des Spannungszustandes am fertigen Teil mit Hilfe von Feindehnungsmessungen, wobei sich aber nur die Spannungen an der Oberfläche erfassen lassen.

Damit örtliche Spannungsmessungen in Hohlkehlen und Bohrungen möglich sind, müssen die Feinmeßgeräte eine kleine Meßlänge haben. Man geht aber im allgemeinen bei mechanischen Meßgeräten nicht unter 0,5 mm.

Die Kenntnis der höchsten Spannungsspitze allein genügt noch nicht zur Bestimmung der Dauerhaltbarkeit eines Bauteiles. Durch Versuche wurde festgestellt,

daß ein Dauerbruch nicht eintreten brauchte, wenn eine örtlich begrenzte Spannungsspitze über die Dauerfestigkeit des glatten Stabes aus dem gleichen Werkstoff hinausgeht.

Der Dauerbruch ist ja eine Folge von Gleitungen in den einzelnen Kristallen, die bei jedem Wechsel wieder rückgängig gemacht werden. Diese Gleitungen werden durch die bei jedem Spannungszustand auftretenden Schubspannungen hervorgerufen, und die größte auftretende Schubspannung wird von dem Unterschied zwischen größter und kleinster Hauptspannung bestimmt.

Bei bestimmten Spannungszuständen kann also die Spannungsspitze scheinbar abgebaut werden. Zur Kennzeichnung der Fähigkeit eines Werkstoffes bzw. Bauteiles, Spannungserhöhungen über die Dauerfestigkeit des glatten Stabes zu ertragen, wurde die Kerbempfindlichkeitszahl η_k eingeführt, die außer vom Werkstoff auch vom Spannungszustand abhängt.

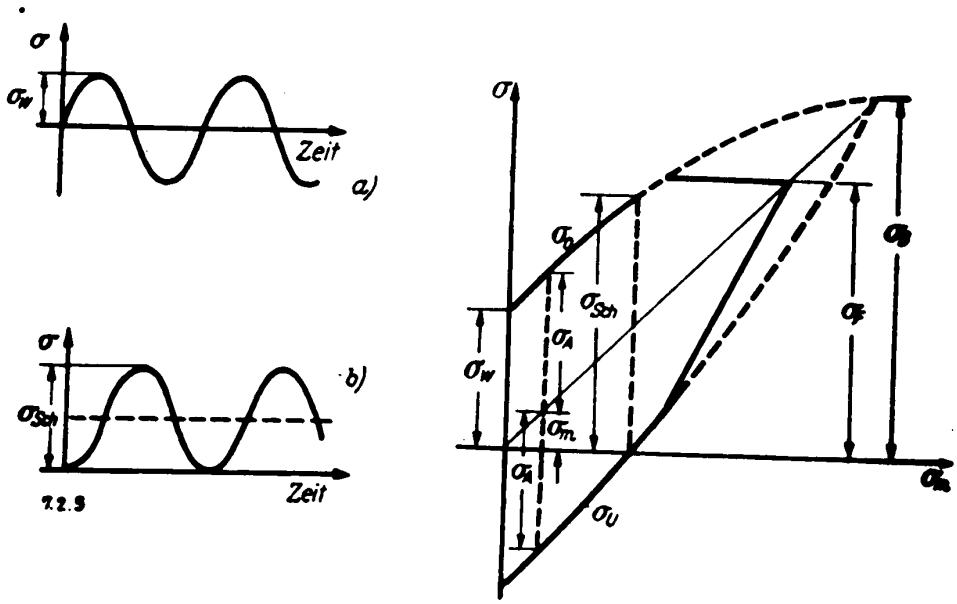


Bild 5. Dauerfestigkeitsschaubild

a Wechselfestigkeit σ_w bei wechselnder Beanspruchung; *b* Schwellfestigkeit σ_{Sch} bei schwellender Beanspruchung

Die Berechnung der Dauerhaltbarkeit mit Hilfe von Formziffer und Kerbempfindlichkeitszahl bereitet erhebliche Schwierigkeiten. Man hat deshalb für diese beiden Werte eine einzige Kennziffer eingeführt, die Kerbwirkungszahl β_k. Diese Zahl gibt das Verhältnis der Dauerfestigkeit des glatten Stabes zur Nenndauerfestigkeit des Bauteiles bzw. gekerbten Stabes an. Die genaue Ermittlung der Kerbwirkungszahl ist nur durch Dauerversuche möglich. Bei ähnlichen Spannungszuständen und Werkstoffen ändern sich die β_k-Werte etwa im gleichen Verhältnis wie die α_k-Werte, so daß es für den Fall, daß die Dauerhaltbarkeit eines Bauteiles durch kleine Konstruktionsänderungen erhöht werden soll, genügt, α_k durch Feindehnungsmessungen zu bestimmen.

Bollenrath und *Troost* geben als Beziehung zwischen dem Formfaktor α_k, der Kerbwirkungszahl β_k, der Zugfestigkeit σ_B und dem Abrundungshalbmesser ϱ der Kerbe an:

$$\frac{\beta_k}{\alpha_k} = 1 - \frac{\frac{1540}{\sigma_B}}{1 + \frac{\sigma_B}{13700} + \varrho} \qquad \begin{array}{l} \sigma_B \text{ in kg cm}^2 \\ \varrho \text{ in cm.} \end{array}$$

Die Werte für β_k können zwischen 1 und α_k liegen. Bei wenig kerbempfindlichen Werkstoffen, z. B. Gußeisen geringer Festigkeit, ist β_k angenähert 1. Bei stark kerbempfindlichen Werkstoffen, z. B. bei hochvergüteten Stählen, nähert sich β_k dem Wert α_k.

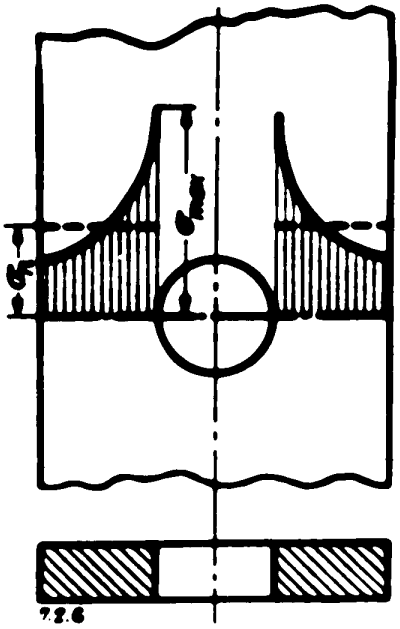


Bild 6. Spannungsverteilung in einem Flachstab mit Querbohrung bei Zugbeanspruchung

σ_{max} höchste Spannungsspitze am Lochrand; σ_n Nennspannung (Berechnung unter Annahme gleichmäßiger Spannungsverteilung); $\sigma_{max} = \alpha_k \cdot \sigma_n$; α_k = Formziffer

Es soll nun an einigen Beispielen gezeigt werden, wie sich die Dauerfestigkeit durch verschiedene Einflußgrößen verändert.

8. Oberflächeneinfluß

Ein Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit macht sich bei zügiger Prüfung der Festigkeitswerte nur in geringem Maße bemerkbar, während die Oberflächenbeschaffenheit bei Dauerbeanspruchung einen erheblichen Einfluß hat. Bei Biege- und Verdrehwechselbeanspruchung, d. h. bei dem größten Teil der praktisch auftretenden Dauerbeanspruchungen, tritt die höchste Spannung an der Oberfläche

auf. Die ersten Dauerrisse entstehen als solche an der Oberfläche. Mikroskopische Kerb- und Lockerstellen im Gefüge, Schlacken, Graphitadern und Bearbeitungsriefen bestimmen die Dauerfestigkeit der Oberfläche. Besonders groß ist der Rauhigkeitseinfluß an der Oberfläche von hochfesten Werkstoffen.

Aus den beiden Abbildungen geht die Beeinflussung der Dauerbiegefestigkeit hervor. Obwohl die Dauerfestigkeit an polierten Proben bestimmt wird, ist zu berücksichtigen, daß auch durch das Polieren keine ideale unbeeinflußte Oberfläche erzielt wird. Die Oberflächenrauhigkeit beträgt noch immer 0,4 μ und die Oberfläche enthält Druckeigenspannungen von etwa 50 kg mm², die aber schon in einigen Hundertstelmillimetern Tiefe auf Null absinken.

Das elektrolytische Polieren kann durch Abtragung der eigenspannungsbehafteten Schicht entweder verschlechternd oder durch Verbesserung der Oberflächengüte dauerfestigkeitserhöhend wirken.

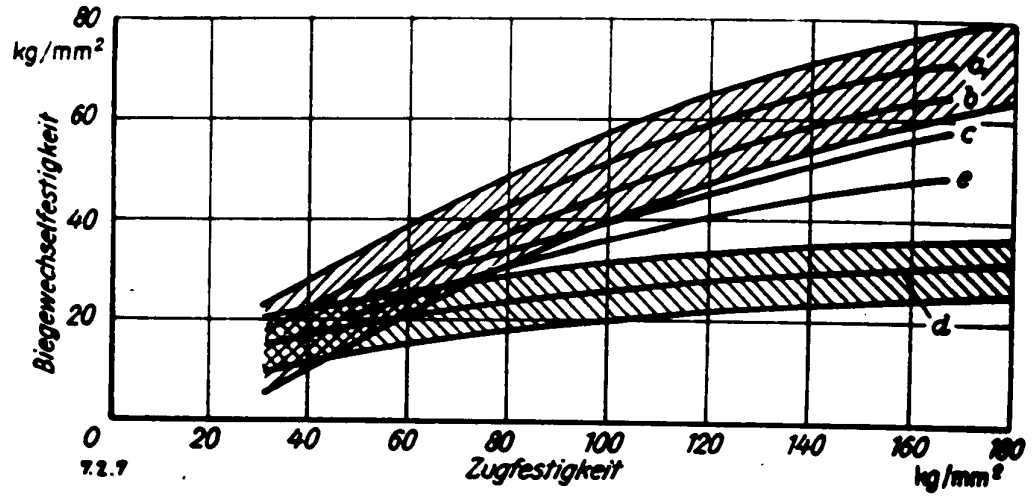


Bild 7. Abhängigkeit der Wechselfestigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit (Mittelwertskurven)

a polierte Oberfläche; *b* geschliffene Oberfläche; *c* gedrehte Oberfläche; *d* Bund; *e* Scharfkerb. Für *a* und *d* sind die Streubereiche eingezeichnet

Durch das Schleifen wird die Dauerfestigkeit gegenüber dem polierten Zustand beträchtlich vermindert. Es entstehen besonders bei grober Körnung der Schleifscheiben Schleifriefen, die, wenn sie quer zur Beanspruchungsrichtung laufen, schädigend wirken. Außerdem findet eine örtliche Erhitzung der Oberfläche statt, die nach der Abkühlung schädliche Zugeigenspannungen hervorruft. Das Schleifen sollte also immer naß, mit Scheiben feiner Körnung geschehen.

Durch Schruppen und Schlichten wird die Dauerfestigkeit noch stärker gesenkt als durch Schleifen. Beim Schruppen können feine Anrisse im Material entstehen, die auch beim nachfolgenden Schlichten und Polieren nicht entfernt werden können und dann als äußerst scharfe Kerben wirken.

Der Dauerfestigkeitsabfall der Walzhaut ist weniger durch die Unregelmäßigkeit der Oberfläche als durch ihre Entkohlung bedingt.

Durch Feinstbearbeitung, wie Preßpolieren, Honen, Läppen, Rollen, Drücken und Strahlen, können günstigere Dauerfestigkeitswerte erreicht werden als durch Polieren. Die Oberflächenschicht wird verdichtet, und es entstehen Druckeigenspannungen, die das Auftreten von Daueranrissen an der Oberfläche erschweren. Besonders gute Verbesserungen erzielt man durch Rollen und Drücken an Querschnittsübergängen und Querbohrungen.

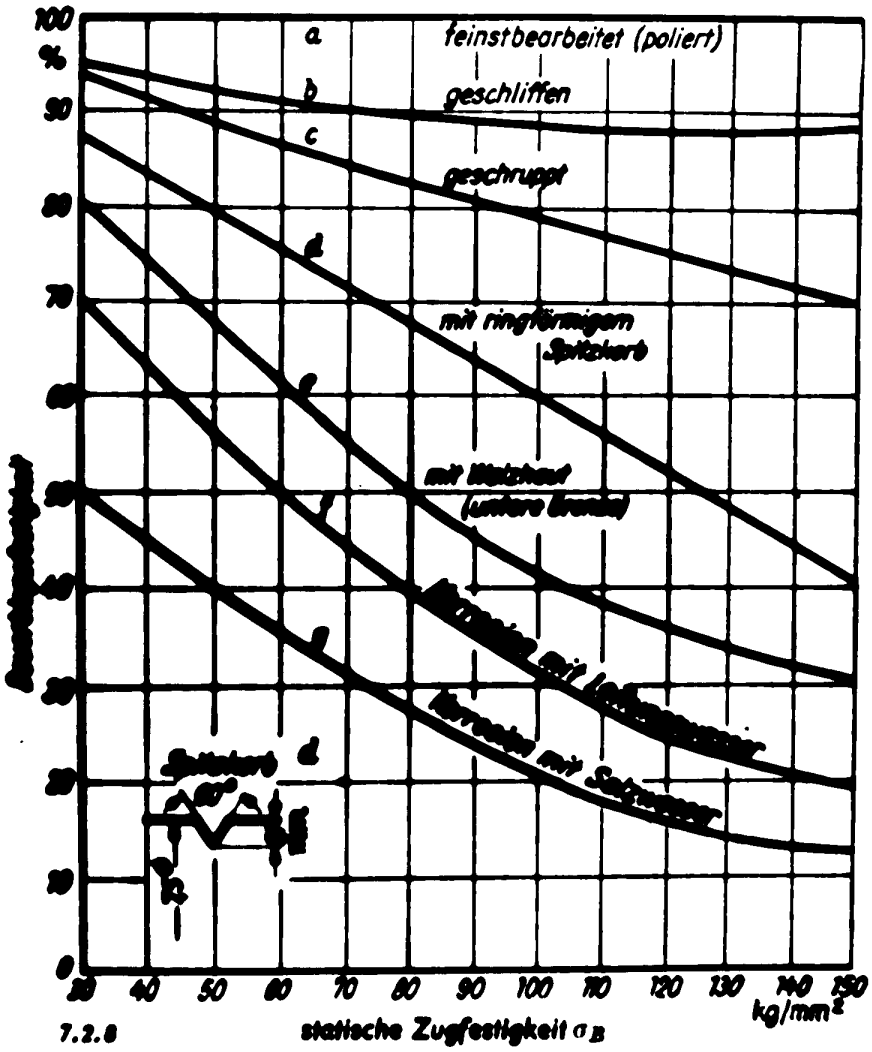


Abb. 8. Abfall der Dauerbiegefestigkeit bei verschiedener Oberflächenbeschaffenheit

Durch Einsatzhärten, Oberflächenflammenhärten sowie durch Nitrieren läßt sich [illegible] die Dauerfestigkeit erhöhen. Die höhere Dauerfestigkeit der Härteschicht [illegible] durch das größere spezifische Volumen entstandenen Druckeigenspannungen [illegible] den Anriß an der Oberfläche. Die Dauerbrüche nehmen dann meist [illegible] der Härteschicht ihren Ausgang. Bei einsatzgehärteten und nitrierten [illegible] Proben kann die Dauerfestigkeit der glatten Proben überschritten [illegible].

Tafel 1. St[illegible] Oberflächenhärten (Einsatzhärten und Nitrieren. [illegible] Einspannwechseldruck $p = 12$ **kg/mm²**.

Ausgangswerkstoff Einspann-Wechselfestigkeit		Oberflächengehärteter Stahl				
σ_{nbW} kg/mm²	in % der Werkstoff-wechsel-festigkeit	Behandlung	Zug-festigkeit σ_B kg/mm²	Biege-wechsel-festigkeit σ_{bW} kg/mm²	Einspann-Wechselfestigkeit σ_{nbW} kg/mm²	Erhöhung in %
14	57	einsatzgehärtet	~ 60	48	42	300
15,5	30,5	nitriert	—	64	57	365

Tafel 2. Einfluß des Nitrierens auf die Dauerfestigkeit gekerbter Stäbe

Behandlung	Nicht nitriert kg/mm²	Nitriert[1]) kg/mm²
Zugfestigkeit	71—73	—
Biegeschwingungsfestigkeit, Stäbe glatt, poliert	39—40	55—56
Biegeschwingungsfestigkeit, Stäbe mit Hohlkehle[2])	—	55—56
Biegeschwingungsfestigkeit, Stäbe mit Rundkerb[3])	—	55—56
Biegeschwingungsfestigkeit, Stäbe mit Rundkerb[4])	—	rd. 50
Biegeschwingungsfestigkeit, Stäbe mit Scharfkerb[5])	20	57—58
Biegeschwingungsfestigkeit, Stäbe mit Scharfkerb[6])	22—23	36

Die Beanspruchungen der gekerbten Stäbe sind auf den Stabdurchmesser im Kerbgrunde bezogen.

9. Korngröße

Der Einfluß der Korngröße der Oberflächenkristalle auf die Biegefestigkeit ist in manchen Fällen beträchtlich. Es sollte auf jeden Fall die Wärmebehandlung so gesteuert werden, daß das dauerfestigkeitsmäßig höher belastbare Feinkorn entsteht.

10. Faserverlauf

Es ist selbstverständlich, daß bei Schmiede-, Preß- oder Ziehteilen die höchsten Dauerhaltbarkeitswerte erreicht werden, wenn die Faserrichtung des Bauteiles mit dem Spannungsfluß übereinstimmt.

---

[1]) Nitrierdauer 92 Stunden.
[2]) Am Übergang zu den Einspannenden r = 0,5 mm.
[3]) Stab-Dmr. 8,5 mm; eingekerbt auf 7,4 mm Dmr.; Kerbe r = 1 mm
[4]) „ 12 mm; „ „ 7,4 mm „ ; „ r = 1 mm.
[5]) „ 8 mm; „ „ 7,4 mm „ ; „ r = 0,3 mm.
[6]) „ 11 mm; „ „ 7,4 mm „ ; „ r = 0,3 mm.

Tafel 3. *Einfluß der Korngröße von Oberflächen-Kristalliten auf die Biegewechselfestigkeit von Stählen; nach A. Schaal*

Stahl mit	Wärmebehandlung (geglüht) Zeit/Temperatur	Kornart	Streckgrenze bzw. 0,2-Grenze kg/mm²	Zugfestigkeit σ_B kg/mm²	Biegewechselfestigkeit $\pm \sigma_{bW}$ kg/mm²	$\frac{\sigma_{bW}}{\sigma_B}$
0,2 % C	1 h / 500° C	fein	32	44	27	0,61
	1 h / 600° C	grob	32	44	22	0,50
0,45 % C	Anlieferung	fein	32	60	26	0,43
	1 h / 400° C	grob	32	60	22	0,37
0,75 % C	Anlieferung	fein	45	78	33	0,42
	1 h / 500° C	gemischt	45	78	31	0,40
1 % C, 1 % Cr	Anlieferung	fein	40	68	28	0,41
	1 h / 500° C	gemischt	40	68	26,5	0,39
0,4 % C, 1,75 % Mn	1 h / 500° C	fein	75	88	42,5	0,48
	1 h / 650° C	grob	55	60	25,5	0,42
0,1 % C, 1,3 % Cr, 4,5 % Ni	2 h / 500° C	gemischt	82	102	42	0,41
	2 h / 600° C	grob	75	96	34	0,35
0,3 % C, 1 % Mn, 1,05 % Cr, 0,2 % Mo	1 h / 500° C	fein	50	65	33	0,51
	1 h / 600° C	grob	42	56	27	0,48
0,07 % C, 1,15 % Mn, 0,35 % Cr, 0,15 % V	1 h / 500° C	fein	98	102	50	0,49
	1 h / 680° C	grob	46	74	24	0,32

[illegible]. Korrosion

Bei der Korrosion werden durch die entstehenden Oberflächenverletzungen die Dauerhaltbarkeiten herabgesetzt.

Die Korrosionsdauerfestigkeit hängt weniger von der Höhe der normalen Dauerfestigkeit des Materials ab als von dem Korrosionswiderstand, der Art des Korrosionsmittels und der Einwirkungszeit. Die Wöhler-Kurven fallen schnell ab und verlaufen auch bei $100 \cdot 10^6$ Lastspielen noch nicht parallel zur Abszisse. Oft muß man sich mit der Bestimmung der Zeitfestigkeit für eine bestimmte Lastspielzahl begnügen.

Säuren, Laugen, ungeeignete Öle und Fette, Seewasser, Leitungswasser und der Luftsauerstoff können korrodierend wirken.

[illegible]. Oberflächenüberzüge

Oberflächenüberzüge, die zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit oder Verbesserung des Aussehens beitragen, beeinflussen die Dauerfestigkeit nur wenig. Lack-, Blei-, Zinn-, Kadmium- und Kupferschichten zeigen keinen Einfluß. Durch Verchromen und Vernickeln wird die Dauerfestigkeit etwas herabgesetzt, wahrscheinlich durch die vorangegangene Beizbehandlung. Bei dauerbeanspruchten, durch galvanische Überzüge geschützten Teilen empfiehlt es sich, eine Wärmebehandlung bei etwa 200° zur Austreibung des in der Oberfläche sitzenden Wasserstoffes durchzuführen. Durch Inchromieren, d. h. Diffusionsglühen von Stahlteilen in Chromsalzen oder -pulver läßt sich an der Oberfläche eine 35 %ige Chromschicht erzeugen, die außerordentlich korrosionsfest ist.

13. Trainieren und Überlastung

Verfestigung und Zerrüttung [illegible] bei der Dauerbeanspruchung auftreten, werden durch Gleitungen hervorgerufen. Diese Gleitungen werden mit zunehmender Verfestigung mehr in elastische Verformungen übergeführt. Auf Grund dieser Anpassung an die Belastung kann dann der Werkstoff etwas höhere Belastungen aufnehmen. Diese Erscheinung der Steigerung der Dauerhaltbarkeit durch allmähliche Steigerung der Belastung wird mit Trainieren bezeichnet. Die Zahl der notwendigen Lastspiele beträgt bei Stahl ungefähr $4 \cdot 10^6$ bis $10 \cdot 10^6$. Die Belastungssteigerung soll nur ungefähr 10 % sein, wobei dicht unter der Dauerfestigkeit begonnen werden muß, da sonst keine nennenswerten Gleitungen auftreten und infolgedessen auch keine Gleitverfestigung stattfindet. Gekerbte Stäbe lassen sich höher trainieren als glatte; weiche Stähle mit ihren höheren Gleitbeträgen eignen sich besser zum Trainieren als härtere.

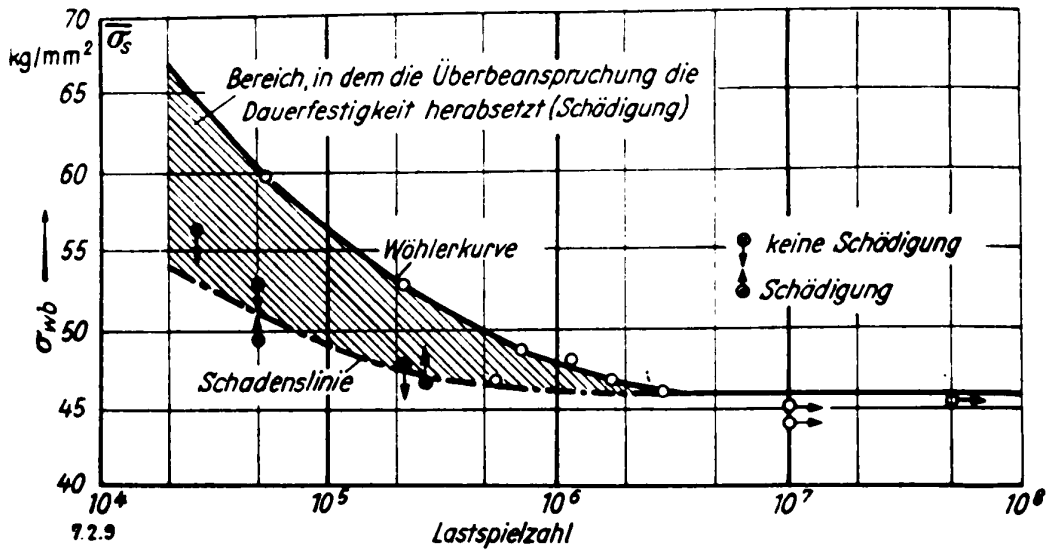


Bild 9. Wöhler-Kurve und Schadenslinie

Für die Belastbarkeit im Betrieb ist der Einfluß von höheren Überlastungen, die über die Dauerfestigkeit des Teiles hinausgehen, besonders wichtig. Wenn die Überlastung nur wenige Lastspiele andauert, dann kann die Zerrüttung noch ohne Einfluß auf die Dauerfestigkeit sein. Bei einer größeren Zahl von Lastspielen kann dann die Zerrüttung die Verfestigung überwiegen, und eine Schädigung tritt ein. Die sogenannte *Schadenslinie* gibt an, wieviel Belastungen bei einer bestimmten Überlast aufgebracht werden können, ohne daß die Dauerfestigkeit abnimmt.

14. Bauteilprüfung

Das genaueste Verfahren zur Ermittlung der Gestaltfestigkeit ist die Bauteilprüfung unter betriebsmäßiger Beanspruchung, wobei Einspannungen, Verschraubungen, Nietungen und Schweißungen mitgeprüft werden und durch die Dauer-

anrisse sofort die schwachen Stellen einer Konstruktion gefunden werden können. Bei der Prüfung der Bauteile ist auch zu berücksichtigen, daß diese nur in seltenen Fällen einer immer gleichbleibenden Wechsellast unterworfen werden. Es treten vereinzelt Spitzenbelastungen auf, die im Prüfprogramm zu berücksichtigen sind. Die Belastungsarten lassen sich in drei Gruppen einteilen:

1. Belastungen durch schwingende oder sich beliebig ändernde Kräfte,
2. Belastungen durch gleichbleibende oder in bestimmten Grenzen sich ändernde Verformungen,
3. Belastungen durch Einleiten eines bestimmten Arbeitsbetrages.

15. Dauerbruchstatistik

In Tafel 4 ist eine Zusammenfassung der Ursachen von Schadensfällen, die als Folge von Dauerbrüchen auftraten, gebracht.

Tafel 4. Dauerbruch-Statistik

Art des Bruches	Anzahl der Brüche	Von der Anzahl der Brüche entfallen auf			
		Werkstoff (Herstellung)	Weiterverarbeitung[1])	Werkstatt[2])	Konstruktion und Betrieb
Bau- u. Maschinenteile[3]) (1932 bis 1939)	465	4 %	8 %	22,5 %	65,5 %
Flugmotorenteile[4])	4142	0,5 %	—	13,5 %	86 %

Anteile für Konstruktion und Betrieb					
Gesamt	falsche Werkstoffauswahl	fehlerhafte Konstruktion	Oberflächenfehler[5])	Kerbwirkungen[6])	Überbelastungen[7])
65,5 %	1 %	5,5 %	19 %	33 %	7 %
86 %	—	—	6 %	3,5 %	76,5 %

Daraus geht die Notwendigkeit, sich mit der Frage der Kerbwirkung zu beschäftigen, eindeutig hervor. Fehler durch Werkstoffherstellung sowie durch die Werkstattbearbeitung und Weiterbehandlung als Bruchursachen von Bauteilen kamen verhältnismäßig selten vor. Die durch Konstruktion und Betriebseinflüsse hervorgerufenen Brüche überwiegen mit 65 % im Maschinenbau und 86 % im Flugmotorenbau. Die Dauerbrüche sind hauptsächlich auf Kerbwirkungen und Überbelastungen zurückzuführen.

[1]) Kalt- und Warmformgebung, Wärmebehandlung.
[2]) Fertigbearbeitung, Montage, Wartung, Reparatur.
[3]) Nach Schrifttumsangaben zusammengestellt.
[4]) Nach *W. Müller – von der Heyden.*
[5]) Freßstellen, Reibkorrosion, Korrosion, Narben, Überwalzungen.
[6]) Hohlkehlen, Bohrungen, Gewinde, Keilnuten.
[7]) Resonanzschwingungen, Belastungsschwankungen.

16. Zusammenfassung

Die allgemein im Maschinenbau und insbesondere im Elektromaschinenbau angestrebten Leistungssteigerungen führen zwangsläufig zum Leichtbau und damit zur optimalen Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften.

Es genügt nicht mehr, nur mit statischen Festigkeitswerten zu rechnen, sondern es ist der Einfluß von Querschnittsübergängen an Bauteilen durch Versuche praktisch zu erproben. Die an den Störstellen des gleichmäßigen Spannungsflusses auftretenden Höchstspannungen werden unter ruhender Belastung mit Hilfe mechanischer, elektrischer, röntgenographischer oder spannungsoptischer Meßverfahren oder durch Rechnung ermittelt. Unter Berücksichtigung der Formziffer α_k und der Kerbwirkungszahl β_k sind zur Milderung konstruktiv bedingter Kerbwirkung Bauteile von überall gleicher Gestaltfestigkeit anzustreben und durch Verbesserung der Oberflächengüte, durch Entlastungskerben, Oberflächendrücken und Oberflächenhärten alle Möglichkeiten auszunutzen, um die Konstruktion betriebssicherer Maschinen zu erreichen.

Literatur

[1] *Dubbel:* Taschenbuch für den Maschinenbau. 11. Aufl. Band II. Springer-Verlag, Berlin 1953.

[2] *Siebel, E.:* Handbuch der Werkstoffprüfung. Band 2. Springer-Verlag, Berlin 1939.

[3] *Schmalz, G.:* Technische Oberflächenkunde. Berlin 1936.

[4] *Wiegand, H.:* Oberfläche und Dauerfestigkeit. Berlin-Spandau 1940.

[5] *Neuber, H.:* Kerbspannungslehre. Berlin 1937.

[6] *Thum, A.:* Die Entwicklung der Lehre von der Gestaltfestigkeit. Z. VDI. (1944) S. 609.

[7] *Eichinger, A.:* Zur Frage der Wirkung des Oberflächendrückens auf die Dauerfestigkeit. Z. VDI. (1950) S. 35.

[8] *Bürnheim, H.:* Kurzverfahren zur Ermittlung der Dauerfestigkeit von Werkstoffen. Z. VDI. (1952) S. 744.

[9] *Schwaigerer, S.:* Experimentelle Ermittlung der Spannungen in Bauteilen. Z. VDI. (1952) S. 1025.

[10] *Fink, K.:* Zweckmäßige Auswahl von Dehnungsmeßverfahren. Z. VDI. (1952) S. 1037.

[11] *Hempel, M.:* Dauerfestigkeitsprüfungen und Werkstoffverhalten bei der Schwingungsbeanspruchung. Z. VDI. (1952) S. 809.

[12] *Niemann, G.,* u. *H. Glaubitz:* Einfluß der Oberflächenrauheit auf die Biegewechselfestigkeit von ungehärtetem und vergütetem Stahl. Z. VDI. (1952) S. 855.

[13] *Gaßner, E.:* Auswirkung betriebsähnlicher Belastungsfolgen auf die Festigkeit von Flugzeugbauteilen. Jahrb. dtsch. Luftfahrtforschg. (1941) S. I 472.

[14] *Bollenrath, F.,* u. *A. Troost:* Wechselbeziehungen zwischen Spannungs- und Verformungsgradient. 3. Teil: Kerbempfindlichkeit. Arch. Eisenhüttenw. (1952) S. 193.

[15] *Müller, W.,* u. *v. d. Heyden:* Dauerbrüche an Motor- und Zellenteilen. Lilienthal-Ges. f. Luftfahrtforschg. Bericht 116 (1939) S. 3.

7.3 Prüfung von Drehreglern und Phasenreglern

Ing. *W. Brokop*, Berlin

Es wird eine Prüfschaltung beschrieben, bei der die zu untersuchenden Dreh- und Phasenregler in ihrer betriebsmäßigen Schaltung mit jeder beliebigen Last bei jedem beliebigen Leistungsfaktor bis zur vollen Durchgangsleistung belastet werden können. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß neben dem zu prüfenden Regler noch zwei weitere Regler passender Leistung und Spannung zur Verfügung stehen.

Die Prüfung von Drehreglern und Phasenreglern dient zur Feststellung der elektrischen Eigenschaften und der Erwärmung bei Abgabe der Nennleistung. Es werden dabei zunächst die kalten Widerstände der Wicklungen bestimmt, ferner die

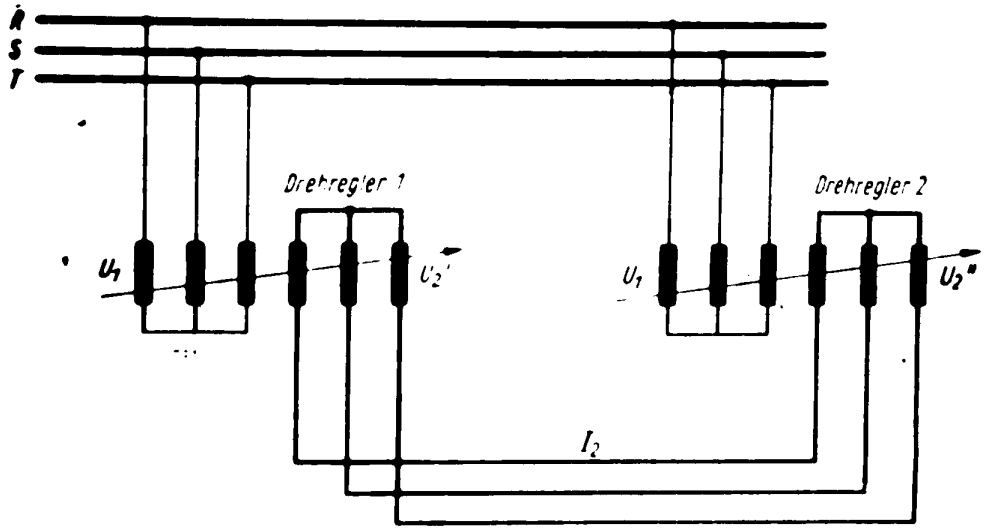


Bild 1. Rückarbeitsschaltung zweier Drehregler

Leerverluste, Leerlaufströme, Kurzschlußströme und Übersetzungsverhältnisse. Die Messung dieser Daten ist ohne Schwierigkeiten bei jedem Drehregler möglich, auch dann, wenn nur ein einzelner Regler gebaut wurde. Die Bestimmung des Wirkungsgrades ist nur dann genau möglich, wenn die Erwärmung der Wicklungen und der Primärstrom genau bekannt sind. Diese Daten können durch einen Dauerversuch mit voller Leistung ermittelt werden. Bei kleineren Reglern kann man ohmsche Widerstände und normale Asynchronmotoren als Belastung verwenden; durch Änderung der Widerstände und Belastung der Asynchronmotoren, etwa durch Gleichstromgeneratoren, ist die Leistung und der Leistungsfaktor einstell-

bar. Sind die Regler gleich gr[illegible] Z[illegible]spannung nur gering, so ist die Durchgangsleistung sehr gr[illegible] Belastungsversuch würde sehr große Energiemengen verbrauchen, wenn man in der gleichen Weise wie bei kleineren Reglern Widerstände und Asynchronmotoren als Belastung verwenden würde.

Steht ein zweiter, gleichartiger Drehregler wie der zu prüfende zur Verfügung, so kann man, wie in Nürnberg: „Die Prüfung elektrischer Maschinen" beschrieben ist, eine Rückarbeitsschaltung anwenden. Diese Schaltung ist in Bild 1 dargestellt. Hierbei werden die Primärwicklungen beider Regler an das Netz gelegt, die Sekundärwicklungen in Stern geschaltet und unter Berücksichtigung gleicher Phasenlage aufeinandergeschaltet. Verdreht man nun einen der beiden Regler, so entsteht eine resultierende Spannung, die in den beiden in Serie liegenden Wicklungen den

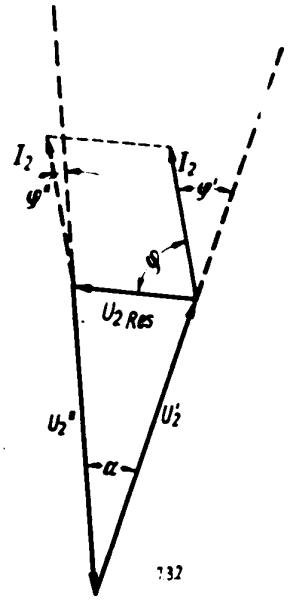


Bild 2. Vektordiagramm zur Rückarbeitsschaltung

U_{2Res} resultierende Sekundärspannung; I_2 Ausgleichstrom; φ Nacheilwinkel

Strom I_2 verursacht. Da der Widerstand dieses Stromkreises hauptsächlich induktiv ist, eilt der Strom I_2 der resultierenden Spannung U_{2Res} um einen ziemlich großen Winkel nach, I_2 fällt dadurch annähernd in die Richtung der Sekundärspannungen U'_{2Ph} und U''_{2Ph}, wie aus Bild 2 zu ersehen ist. Die Sekundärwicklungen sind also mit I_2 belastet, wobei der Leistungsfaktor etwa bei $\cos\varphi = 1$ liegt. Da die Größe des Primärstromes sich nach dem Leistungsfaktor der Sekundärwicklung richtet, weicht dieser Strom etwas von dem Wert ab, der sich beim endgültigen Anschluß des Drehreglers und bei Vollast mit dem Nennleistungsfaktor einstellen wird. Man wird also nicht die genaue Erwärmung des Drehreglers ermitteln, die er beim endgültigen Betrieb haben wird. Es ist hierzu nötig, aus der Belastung und dem Leistungsfaktor der Last den dazugehörenden Primärstrom zu ermitteln und die bei Vollast zu erwartende Erwärmung umzurechnen.

Anläßlich der Entwicklung von Drehregler-Reihen wurden mehrere Versuchsmuster gebaut. Es war dadurch möglich, daß man jeden der zu untersuchenden

Drehregler mit zwei anderen Reglern ähnlicher Spannungsverhältnisse und Leistungen zu einer Kreisschaltung zusammenschalten konnte. Dieses gestattete, die Versuchsmuster in jeder Rotorstellung mit jeder beliebigen Last bei jedem beliebig wählbaren Leistungsfaktor zu belasten. Es konnten dadurch alle Belastungs-

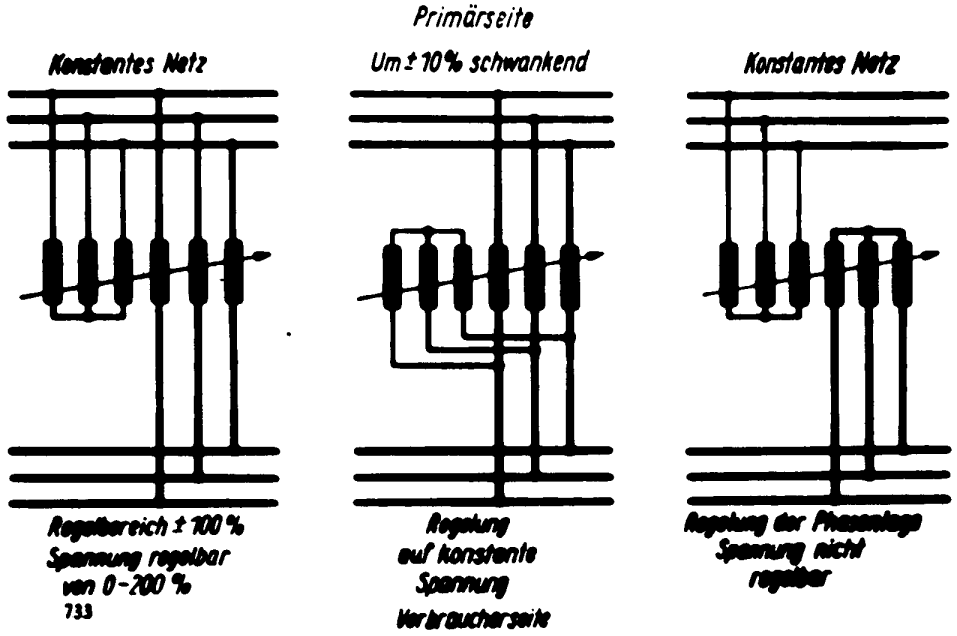


Bild 3. Drehregler-Schaltungen

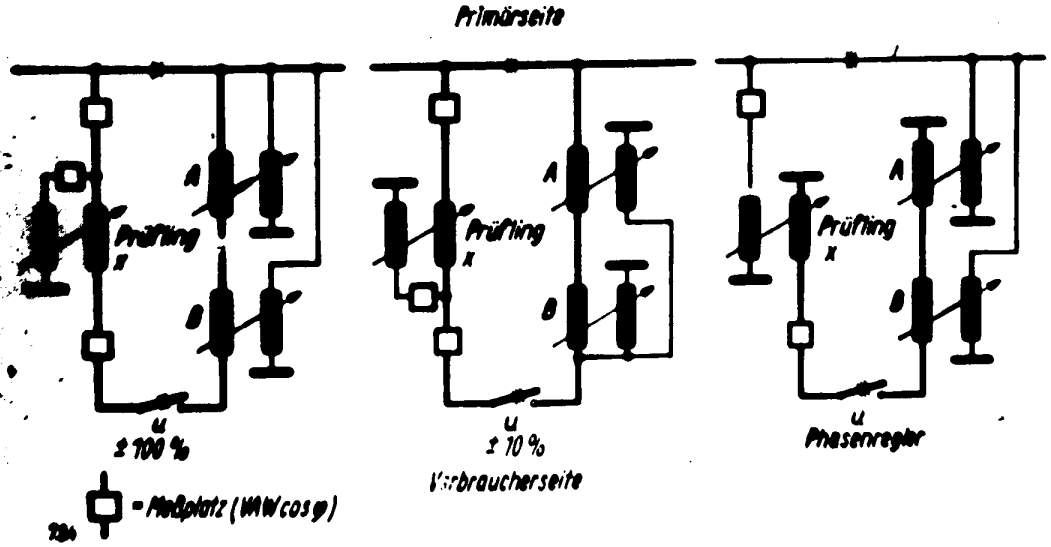


Bild 4. Drehregler-Prüfschaltung für beliebig einstellbare Belastung

charakteristiken aufgenommen werden und auch die Erwärmungsmessungen mit voller Durchgangsleistung beim Nennleistungsfaktor. Bei diesen Messungen führt die Primärwicklung den richtigen, betriebsmäßigen Strom, die Erwärmung des Drehreglers, die sich aus diesen Messungen ergibt, ist die gleiche, wie sie sich im

endgültigen Betrieb zeigen wird, [illegible] stets kleine Ungenauigkeiten anhaften, sind hier nicht [illegible]

Es wurden drei Arten Drehregler entwickelt:

1. Drehregler, welche bei einer konstanten Netzspannung einen Regelbereich von ± 100 % hatten, also das Einstellen einer Verbraucherspannung von etwa 0 bis etwa 200 % der Eingangsspannung ermöglichten;
2. Drehregler, welche bei einer um ± 10 % schwankenden Netzspannung das Einstellen einer konstanten Verbraucherspannung ermöglichten;
3. Phasenregler mit einem festen Übersetzungsverhältnis, bei denen die Sekundärspannung bei voller Belastung etwa gleich der Primärspannung war. Der Spannungsunterschied zwischen Vollast und Leerlauf ist hier größer als bei einem normalen Transformator, da bei dem Phasenregler die Streuung größer ist als bei diesem; sie ist etwa die gleiche wie bei einem Asynchronmotor gleicher Leistung. Durch Verdrehen des Phasenreglers wird nicht die Spannung des Sekundärkreises geändert, sondern nur die Phasenlage gegenüber dem Primärnetz.

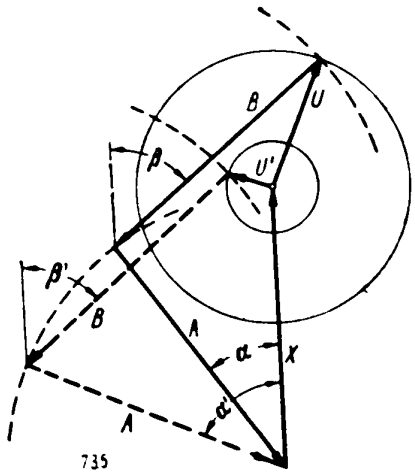


Bild 5. Spannungsvektoren

Prüfschaltung mit zwei Belastungsdrehreglern

a Prüfling; *A*, *B* Belastungsdrehregler; α, β, α', β' Verdrehungswinkel; *U*, *U'* resultierende Spannung

Die Schaltung der drei Reglerarten ist verschieden, und zwar folgendermaßen:

1. Der Primärteil des Drehreglers für einen Regelbereich von ± 100 % liegt am Primärnetz; durch die Sekundärwicklung fließt nur der Verbraucherstrom.
2. Beim Drehregler, der zum Ausgleichen einer um ± 10 % schwankenden Primärspannung dient, liegt der Primärteil am Sekundärnetz. Dadurch fließt in der Sekundärwicklung die geometrische Summe aus Verbraucherstrom und Primärstrom.
3. Der Phasenregler hat zwei völlig getrennte Stromkreise, die in Stern oder Dreieck geschaltet sein können.

Bild 3 zeigt diese drei Schaltungen.

Diese drei verschiedenen Schaltungen erfordern drei verschiedene Prüfschaltungen. Es wird der zu prüfende Regler in betriebsmäßiger Schaltung am Primär-

netz angeschlossen. Zur Messung der Ströme, Spannungen und Leistungen werden die entsprechenden Instrumente in die Zuleitungen, die Läuferleitungen (Primärwicklung) und in die Leitungen zum Verbraucher eingeschaltet. Die abgegebene Leistung wird über einen Schalter mit einer einfachen Synchronisiereinrichtung (3 Voltmeter), welche die richtige Phasenlage erkennen läßt, über zwei gleichartige Drehregler in das Primärnetz zurückgegeben. Durch Verstellen dieser beiden Regler kann man nun jede beliebige Last mit jedem beliebigen Leistungsfaktor in beliebiger Energierichtung einstellen. Die Richtung der Energie, den Leistungsfaktor und ob dieser induktiv oder kapazitiv ist, erkennt man an den Ausschlägen

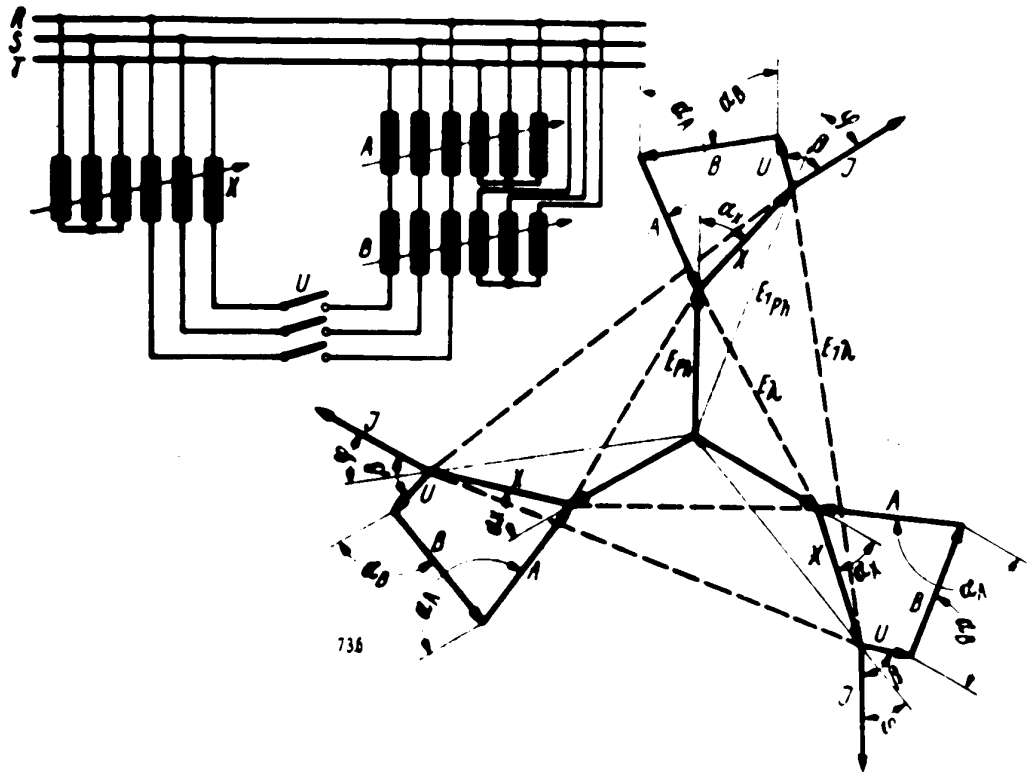


Bild 6. Drehregler für Regelbereich ± 100 %

Prüfschaltung und Vektordiagramm

der in Aronschaltung angeschlossenen Wattmeter. Sehr bequem ist hier die Verwendung eines Leistungsfaktormeßgerätes, welches alle vier Quadranten anzeigen kann. Hierdurch wird die Einstellung der Last bedeutend erleichtert. Die Schaltung der Prüfanordnung für die drei verschiedenen Reglerarten ist in Bild 4 angegeben. Die Stromläufe sind der Einfachheit halber einpolig gezeichnet. Durch die Anwendung von *zwei* Belastungsdrehreglern, die jeder für sich verstellt werden können, ist man in der Lage, eine resultierende Spannung einzustellen, die jede Größe von Null bis zur Summe aller drei in Serie liegenden Sekundärwicklungen haben kann. Die resultierende Spannung kann in *jede* beliebige Richtung von 0 bis 360° el. gebracht werden, sofern die Größe der resultierenden Spannung den Wert der sekundären Phasenspannung *eines* Reglers nicht überschreitet.

7

Bild 7. Energierichtung und Leistungsfaktor bei der Zweiwattmetermethode

x_1	x_2			Belastungsart	
				cos φ	
Richtung	Richtung	zahlenmäßiger Unterschied gegen x_1	Abgabe oder Aufnahme	vor- oder nacheilend	Größenordnung
positiv +	positiv +	größer als x_1	Abgabe	nacheilend	0,5—1
		kleiner als x_1	Abgabe	voreilend	0,5—1
	negativ —	größer als x_1	Aufnahme	nacheilend	0 —0,5
		kleiner als x_1	Abgabe	voreilend	0 —0,5
negativ —	positiv +	größer als x_1	Abgabe	nacheilend	0 —0,5
		kleiner als x_1	Aufnahme	voreilend	0 —0,5
	negativ —	größer als x_1	Aufnahme	nacheilend	0,5—1
		kleiner als x_1	Aufnahme	voreilend	0,5—1

Bild 5 zeigt die Lage der S[illegible]gsvektoren einer Phase. Wird der W[illegible]tor X, die Phasenspannung d[illegible]s, in eine andere Richtung gebracht, [illegible] muß man auch die Vektoren [illegible] die Phasenspannungen der beiden [illegible]lastungsdrehregler, um den gl[illegible]nkel weiterdrehen, um die resultierende Restspannung beizubehalten. Schl[illegible]t man diese resultierende Spannung kurz, so fließt durch die drei Wicklungen ein Strom, dessen Größe und Richtung durch die ohmschen und induktiven Widerstände der Wicklungen gegeben ist. Da der induktive Anteil überwiegt, ist die Nacheilung des Stromes gegenüber dieser Spannung groß, etwa 70 bis 80° el.

Ein Vektordiagramm für alle drei Phasen einer Prüfschaltung für einen Drehregler mit einem Regulierbereich von ±100% zeigt Bild 6. In dem Schaltbild der Prüfanordnung ist der zu prüfende Regler mit X bezeichnet, die beiden Belastungsdrehregler mit A und B. Die Spannungen der einzelnen Teile sind in dem Vektordiagramm ebenfalls mit den Buchstaben X, A und B bezeichnet, die resultierende Restspannung U ist die Spannung, die an dem offenen Schalter meßbar ist. Schließt man den Schalter, so fließt der Strom I. Die Einstellung der Last des Drehreglers X geht nun folgendermaßen vor sich:

1. Der Drehregler wird in diejenige Stellung gedreht, in der man den Erwärmungsversuch oder die Belastungsmessung durchführen will, z. B. in der Maximalstellung.
2. Bei offenem Schalter wird das Primärnetz unter Spannung gesetzt.
3. Durch Verstellen der beiden Regler A und B wird die Spannung U auf Null gebracht und der Schalter geschlossen.
4. Unter Beobachtung der Ausschläge der in Aronschaltung geschalteten Wattmeter und der Strommesser wird durch Verstellen der Regler A und B die gewünschte Leistung und der Leistungsfaktor sowie die Energierichtung eingestellt, wobei beachtet werden muß, ob der Leistungsfaktor voreilend oder nacheilend ist. Dieses ist aus dem Verhältnis $\alpha_1 : \alpha_2$ erkennbar. Die Tafel Bild 7 zeigt die Abhängigkeit der Energierichtung und des Leistungsfaktors von den Ausschlagrichtungen der Wattmeter. Die Größe der Leistung und des Leistungsfaktors werden in der üblichen Weise ermittelt.

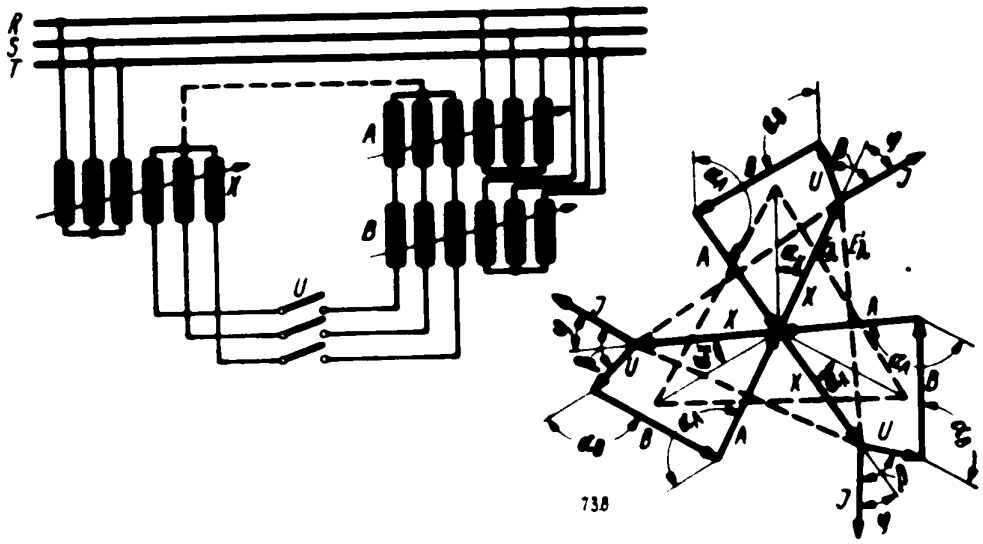


Bild 8. Phasenregler
Prüfschaltung und Vektordiagramm

Diese Schaltung gestattet, da man für jede beliebige Stellung des zu prüfenden Drehreglers jede Belastung bei jedem beliebigen Leistungsfaktor einstellen kann, vollständige Belastungscharakteristiken aufzunehmen, wie etwa die Abhängigkeit der Verbraucherspannung und des Rotorstromes vom Verdrehungswinkel bei konstantem Verbraucherstrom und Verbraucherleistungsfaktor. So läßt sich hier auch leicht feststellen, ob die Drehrichtung des Drehfeldes gegenüber dem Drehsinn des Verstellwinkels richtig ist. In diesem Falle *fällt* nämlich der Rotorstrom, wenn der belastete Regler von der höchsten Stellung abwärtsgeregelt wird. Ist die Drehrichtung des Drehfeldes falsch, so *steigt* der Rotorstrom beim Abwärtsregeln des Reglers aus der höchsten Stellung.

Bei der Prüfschaltung der Phasenregler wird das Vektordiagramm gegenüber Bild 6 dadurch geändert, daß die Phasenspannungen der Phasenregler sich nicht mit den Phasenspannungen des Primärnetzes addieren, wie es beim Drehregler

der Fall ist, sondern unabhängig [illegible] Primärnetz in Dreieck oder Stern geschaltet sind.

Bild 8 zeigt das Vektordiagramm für alle drei Phasen einer Prüfschaltung für Phasenregler; die Wicklungen sind in Stern geschaltet. Die Schaltung der Prüfanordnung ist im Prinzip dieselbe wie beim Drehregler, die Einstellung der Last erfolgt genau wie beim Drehregler.

Zusammenfassung

Bei Anwendung von zwei Drehreglern als Belastung können Dreh- und Phasenregler in ihrer betriebsmäßigen Schaltung mit der vollen Durchgangs- bzw. [illegible]leistung in jeder beliebigen Rotorstellung geprüft werden. Man kann dadurch [illegible]wärmungsprüfungen mit den richtigen Rotorströmen durchführen. Umrechnung von einem Rotorstrom, der sich bei anderen Prüfmethoden ergibt, auf den richtigen Wert sind dabei nicht notwendig. Die vom Prüfling verbrauchte Energie [illegible] bis auf die Verluste in den Drehreglern zurückgegeben.

7.4 Probleme beim Großtransformatorenbau

Dr.-Ing. *W. Blankenburg*, Berlin

1. Einleitung

Die Probleme beim Großtransformatorenbau sind sehr vielfältig. Auf die täglichen Sorgen der Transformatorenbauer hinsichtlich der Verbesserung der Qualität der Transformatorenbleche, der Hartpapiere und der anderen Isoliermaterialien kann infolge des begrenzten Raumes hier nicht eingegangen werden. Aus dem gleichen Grund können auch nicht alle offenen Probleme aufgezeigt werden. Es werden daher nur einige Probleme behandelt, die zum Teil schon ihre Lösung gefunden haben, zum Teil aber noch auf eine brauchbare Lösung warten.

Die Entwicklung hat leider häufig die unangenehme Eigenschaft, zuerst die Lösung des einen Problems zu verlangen, um dann das andere mit der nötigen Sicherheit im Sinne der Rentabilität in Angriff nehmen zu können. Es besteht daher die unbedingte Forderung, alle Verwaltungsstellen, die direkt oder indirekt mit einer technischen Entwicklung verknüpft sind, auf diese Tatsache aufmerksam zu machen, damit sie erkennen mögen, daß häufig bereits ein natürlicher Hemmschuh gegeben ist, der tunlichst durch bürokratische oder andere Maßnahmen nicht vergrößert werden sollte. Der Grundlagenforschung ist ein möglichst breiter Raum zu geben, damit eine wirkliche wissenschaftliche Arbeit betrieben werden kann.

Die technischen Einzelprobleme sind mit den allgemeinen Problemen im Transformatorenbau auf das engste verknüpft. Hierzu zählen

a) die elektromagnetischen Probleme,
b) die Isolationsprobleme unter Berücksichtigung der Wechsel- und Stoßspannung,
c) die Kräfteprobleme,
d) die Erwärmungs- und Abkühlprobleme,
e) und weiter die konstruktiven Probleme, die im besonderen Maße durch den häufig zur Verfügung stehenden begrenzten Bauraum gegeben sind.

Es sei auch daran erinnert, daß das Beförderungsmittel — die Eisenbahn — gezwungen ist, einige entscheidende Forderungen anzumelden, die sich auf das „Eisenbahnprofil", die Objektlänge (Kurvengängigkeit des Fahrgestelles) und das zu befördernde Gewicht (Achstragfähigkeit) beziehen.

Der Käufer des Transformators legt gewöhnlich Wert auf einen Wandertransformator, so daß man also mit möglichst wenig Montagearbeiten die Außerbetriebnahme und Wiederinbetriebnahme an anderer Stelle schnell und sicher durchführen kann.

Diese Gesamtforderungen, und unter Berücksichtigung des einzusetzenden Materials, bestimmen bei bester konstruktiver Durchbildung und Ausnutzung der gegebenen Verhältnisse sowie bei bester Fertigung die Leistung des Transformators. Dabei sind weiter als entscheidend die Forderungen bezüglich der Spannungen und die dazugehörenden Prüfspannungen anzusehen.

2. Erwärmungsprobleme

2.1 *Die Kühleinrichtung*

Von besonderer Bedeutung für die transportfähigen Großtransformatoren ist das Erwärmungsproblem. Im Transformator entstehen zwei Arten von Verlusten:

1. Die Eisenverluste einschl. der Zusatzverluste im Kasten und in den einzelnen Konstruktionsteilen.
2. Die Kupferverluste einschl. der Zusatzverluste durch die Streufelder in axialer und radialer Richtung.

Es entsteht damit vorrangig die Aufgabe, die durch die Verluste erzeugte Wärme aus dem Transformatorkessel nach außen hin an die Luft abzuführen. Der Transportkasten selbst gibt nur einen geringen Wärmebetrag (etwa 6% der gesamten

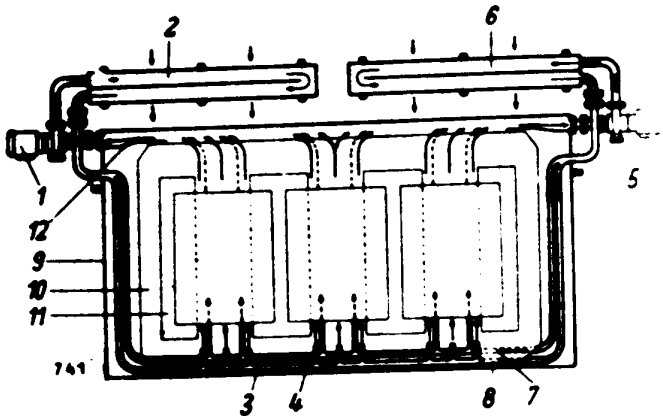


Bild 1. Ölumlaufsystem des Transformators

1 und *5* Ölumwälzpumpe; *2* und *6* Ölkühler; *3* und *7* Ölkanal zu den Spulen; *4* und *8* Ölkanal zum Trafokern; *9* Ölkasten; *10* Transformatorkern; *11* Spule; *12* Saugkanal

Verluste durch Leitung und Strahlung) infolge seiner glatten und teils verdeckten Oberfläche ab. Der größte Teil der erzeugten Wärme muß mittels eines besonderen Kühlers abgeführt werden. Für diese Zwecke steht ein Luft-Öl-Kühler besonders hoher Ausnutzung im Vordergrund.

Als Hilfsmittel für einen derartigen Kühler sind Ölpumpen zur Beförderung der Ölmenge und Ventilatoren zur kräftigen Beblasung des Kühlers notwendig. Hierdurch entstehen für den Betrieb des Transformators zwei weitere Verlustquellen, die indirekt in den Wirkungsgrad der Anlage eingehen. Diese Verlustquellen liegen etwa in der Größenordnung von 10% der gesamten Transformatorverlustleistung.

Um das Abkühlproblem zu bewältigen bzw. einfacher zu gestalten, muß darauf Bedacht genommen werden, daß die Einzelverluste in mäßigen Grenzen bleiben.

Zur guten Öldurchströmung des Transformatorkessels werden Führungsrohre vorgesehen. Unterhalb und oberhalb des Transformatorkernes werden längs des Kessels diese Führungsrohre verlegt und mit einer genügend großen Anzahl von Ausfluß- und Eintrittslöchern vorgesehen.

Diese Löcher sind unten so angeordnet, daß die Eisenkernteile gut bespült werden, während die Wicklungen gesonderte Einlaufkanäle erhalten müssen. Ober-

halb des Transformatorkernes sind die Löcher so angeordnet, daß das Öl längs des Kessels an den Stellen höchster Temperatur abgesaugt wird.

Wenden wir uns nunmehr dem Luft-Öl-Kühler zu, der mit das wichtigste Glied in der Erwärmungsproblematik eines Großtransformators darstellt. Besteht der

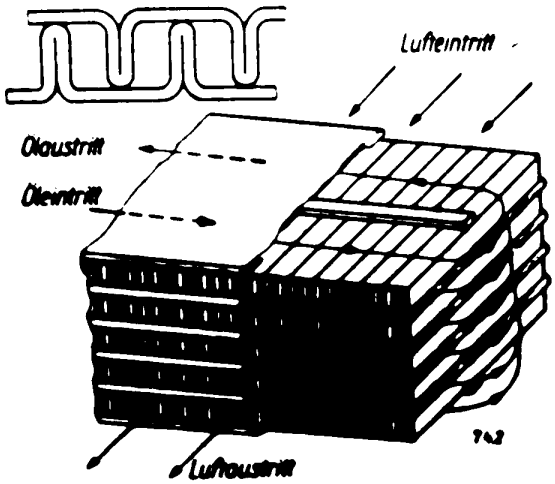


Bild 2. Kreuzstrom-Wellblechkühler

Wunsch nach einem Wandertransformator, dann besteht die Forderung in der Annahme der Verwendung eines Fünfschenkelkernes, daß in dem zwischen oberen Bahnlademaß und dem aktiven Transformator ein kleinräumiger Hochleistungs-

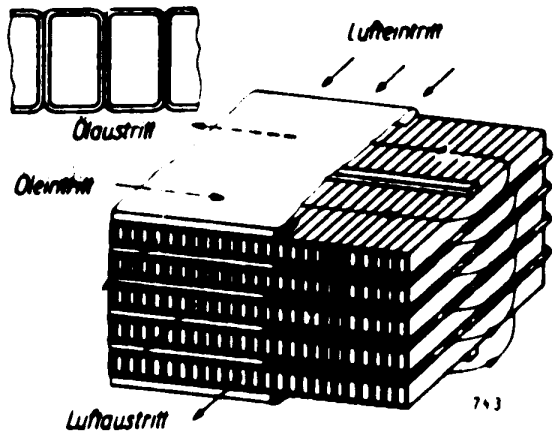


Bild 3. Kreuzstrom-Rechteckrohrkühler

kühler mit einem Oberflächenverhältnis Luftkühlfläche zur Ölkühlfläche beträchtlich größer als Eins vorgesehen werden muß. Dabei muß besonders das abgeschrägte Bahnprofil konstruktiv soweit als möglich ausgenutzt werden.

Von den drei Strömungsprinzipien: das Gleichstrom-, das Kreuzstrom- und das Gegenstromprinzip ist das Kreuzstromprinzip, bei dem die Öl- und Luftströmung

um 90° räumlich versetzt wird, konstruktiv und fertigungstechnisch am einfachsten zu verwirklichen. Die Kühlkanäle für das Öl haben eine große Kanalbreite, aber geringe Kanalhöhe von nur wenigen Millimetern. Die Kühlkanäle für die Luftbeblasung sind stark von der Fertigungsmethodik des Kühlers und der Verschmutzungsgefahr abhängig.

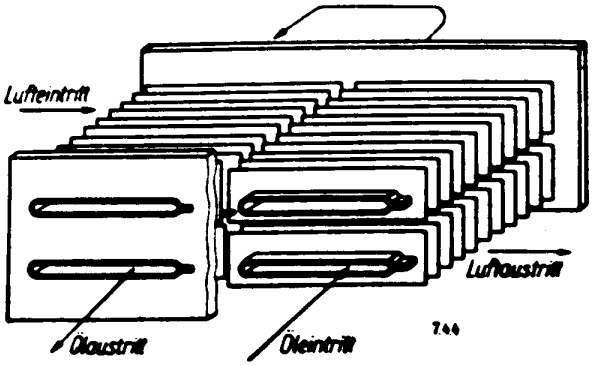


Bild 4. Kreuzstrom-Rippenrohrkühler

Verschiedene Vorschläge wurden eingehend konstruktiv und auch fertigungstechnisch untersucht. Hierzu gehören insbesondere die folgenden Ausführungen:

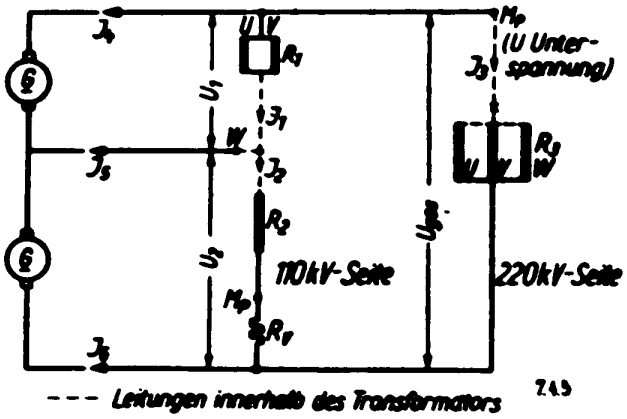


Bild 5. Prinzipschaltbild der Erwärmungsprüfung

1. Die Kühlelemente werden fortlaufend aus Blech geformt (Bild 2).
2. Die Kühlelemente werden aus Viereckrohren zusammengesetzt (Bild 3).
3. Die Kühlelemente werden aus glatten flachen Rohren für die Ölseite, mit aufgesetzten Kühlrippen für die Luftseite versehen aufgebaut (Bild 4).

An den Enden der Kühlerelemente sind Ölverteilungsräume vorgesehen, an denen gleichzeitig die Zu- und Abflußrohrleitungen angeschlossen sind.

Von besonderem Interesse sind nunmehr die für diese Kühlungsart erzielten Ergebnisse. Die Temperaturmessungen wurden, da zwei Gleichstrommaschinen zur Verfügung standen, nach der Schaltung Bild 5 durchgeführt. Die Hochspannungswicklung wurde in Parallelschaltung betrieben; dagegen wurde dazu parallel die Niederspannungswicklung geschaltet, bei der zwei Schenkel parallel und ein Schenkel mit einem Abgleichwiderstand in Reihe liegt. Ein Teil des Versuchsaufbaues geht aus Bild 6 hervor.

Bild 6. Versuchsaufbau der Erwärmungsprüfung

Aus den vielen Versuchen an einem 125-MVA-Transformator gehen abschließend folgende Ergebnisse hervor:

[illegible]verbrauch der Lüfter bei Nennlast	$N = 53$ kW
[illegible]verbrauch der Ölpumpen bei Nennlast	$N = 17$ kW
[illegible] Gesamtleistung der Hilfsapparate	$\Sigma N = 70$ kW
[illegible] Erwärmung der Wicklungen bei Nennlast	$\vartheta = 60°$ C
[illegible]ung des Transformators bei 12 Lüftern	$N = 125$ MVA
[illegible]ung des Transformators bei 10 Lüftern	$N = 120$ MVA
[illegible]ung des Transformators bei 8 Lüftern	$N = 110$ MVA
[illegible]ung des Transformators bei 6 Lüftern	$N = 97$ MVA
[illegible]ung des Transformators bei 4 Lüftern	$N = 80$ MVA
[illegible]ung des Transformators bei Ausfall einer Ölpumpe	$N = 100$ MVA
Fördermenge einer Ölpumpe	$Q = 3300 \frac{dm^3}{min}$
Ölgeschwindigkeit in den Spulen	$v = 7$ cm/s
Ölgeschwindigkeit im Kühler	$v = 1{,}0$ m/s
Luftgeschwindigkeit im Kühler	$v = 25$ m/s
Ölintrittstemperatur in den Ölkühler	$\vartheta = 40°$ C

Diese Angaben beziehen sich auf eine Kühlmitteltemperatur von 35° C.

7

Es ergaben sich ferner für den Kühler bei einer Gesamtverlustleistung des Transformators von $N = 760$ kW und einer Luftkanallänge von über 1 m die folgenden Werte:

$$\frac{\textit{Luftabkühlfläche}}{\text{Ölabkühlfläche}} \approx 1{,}26$$

$$\frac{\textit{Abgeführte Leistung}}{\text{Ölabkühlfläche}} \approx 4{,}1 \text{ kW/m}^2$$

$$\frac{\textit{Abgeführte Leistung}}{\text{Bebauter Raum}} = 160 \text{ kW/m}^3$$

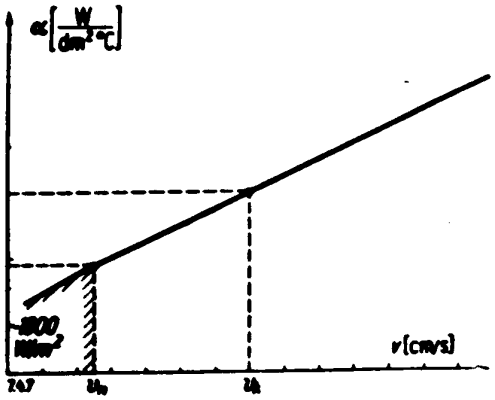


Bild 7. Wärmeübergangszahl α in W/dm² °C in Abhängigkeit von der Ölgeschwindigkeit

Bild 7 gibt uns einen Einblick über die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl α in W/dm² °C von der Ölgeschwindigkeit innerhalb der Wicklung. Bei der Aufstellung dieser Abhängigkeit muß berücksichtigt werden, daß der Wicklungsabkühlfläche eine Ölgeschwindigkeit aufgezwungen worden ist. Bei normaler Umlaufkühlung mit einer mittleren Flächenbelastung von 1600 W/m² ergibt sich eine Ölgeschwindigkeit $v_n = 2{,}5$ cm/s und eine Wärmeübergangszahl $\alpha = 0{,}95$ W/dm² °C. Wird die Ölgeschwindigkeit z. B. auf $v_K = 7$ cm/s erhöht, so ergibt dies eine Er-

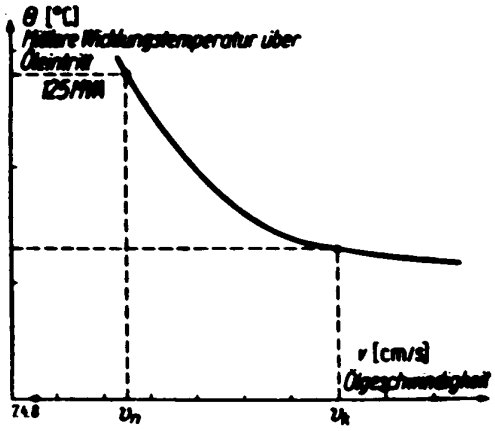


Bild 8. Mittlere Wicklungstemperatur in Abhängigkeit von der Ölgeschwindigkeit

höhung der Wärmeübergangszahl $\varkappa$ um ~ 65 bis 70% und damit einen Gewinn im Temperatursprung von etwa 15° C. Die Wärmeübergangszahl $\varkappa$ ist praktisch unabhängig von der Flächenbelastung der Wicklung und der Öleintrittstemperatur in den Transformator für die hier üblich auftretenden Größen. Die aufgenommene Kurve zeigt den beachtlichen Nutzen durch künstliche Erhöhung der Ölgeschwindigkeit. Diese Ansicht wird durch Bild 8 unterstützt, das die mittlere Wicklungstemperatur in Abhängigkeit von der Ölgeschwindigkeit zeigt.

Bis etwa zur Ölgeschwindigkeit $v_n = 2{,}5$ cm/s reicht die Wirkung der natürlichen Kühlung, während darüber der Nutzen einer künstlichen Kühlung mit erhöhter Ölgeschwindigkeit zum Ausdruck kommt.

Auf Grund der hier erzielten guten Ergebnisse ist eine Kühlertypenreihe zu entwerfen vorgesehen, die bei anderen Transformatoren und Einrichtungen zweckmäßig serienweise Verwendung finden kann. Diese Arbeiten sind noch nicht völlig zum Abschluß gekommen, da noch einige Auslegungs- und Konstruktionsfragen eingehend untersucht und erörtert werden müssen.

2.2 *Die Überprüfung des Erwärmungsvorgangs*

Die Wechselstrom-Prüfanordnungen zur Festlegung des Erwärmungsvorgangs, die mit der vollen Nennspannung arbeiten und somit auch neben der Wirkleistung die Blindleistung aufbringen müssen, verlangen eine große Netzleistung und regelbare Hilfseinrichtungen. Sie steht in der erforderlichen Größenordnung meistens nicht zur Verfügung. Die Messung selbst erfordert weiter die Feststellung des Wicklungswiderstandes zur Berechnung der Übertemperatur. Sie muß unmittelbar nach Abschalten des Belastungstransformators vom Wechselstromnetz erfolgen; eine Verzögerung der Messung ergibt bereits nicht mehr zu vernachlässigende Fehler. Um die Genauigkeit der Messung zu vergrößern, ist daher unter allen Umständen eine Abkühlungskurve aufzunehmen.

Alle diese Schwierigkeiten drängen dazu, ein anderes Verfahren in Anwendung zu bringen. Gut hat sich eine Einrichtung (vgl. Bild 5) bewährt, die eine Gleichstrom-Beheizungseinrichtung des Öles vorsieht, und zwar in der Form, daß damit die Eisenverluste aufgebracht werden. Die Wicklungen werden dagegen so an eine Gleichspannung gelegt, daß einerseits der Kern entmagnetisiert bleibt und andererseits die erforderlichen und bekannten Kupferverluste aufgebracht werden. In den Kupferverlusten sind selbstverständlich auch die örtlich auftretenden Zusatzverluste mit enthalten. Die Prüfung mit Gleichstrom setzt die erforderliche Prüfleistung beachtlich herab. Nebenbei aber ergeben sich noch angenehme Meßmöglichkeiten. Der Entmagnetisierungszustand des Kernes wird einmalig auf einfache Weise mit Hilfe eines Widerstandes und an Hand einer Differenzschaltung abgeglichen. Die Messung des erwärmten Wicklungswiderstandes erfolgt ohne Unterbrechung des eingestellten Belastungsfalles.

Zur laufenden Kontrolle des Transformators im Betrieb wurde eine direkt anzeigende Temperatureinrichtung erprobt. Sie besteht aus einem Anzeigeinstrument mit angeschlossenen Thermoelementen. Die Temperaturfühler sind am Ende der stark isolierten Kupferwicklung angebracht und führen innerhalb des Ableitungsrohres nach der Durchführung. Auf der Luftseite ist das Anzeigeinstrument vom Boden aus ablesbar angeordnet. Die Temperaturmeßeinrichtung gibt somit also im normalen Betrieb die Übertemperatur der Wicklung gegenüber der Raumtemperatur in jedem Augenblick an.

3. Konstruktive Probleme

3.1 *Das Ausdehnungsgefäß*

Durch die Erwärmung des Transformators entsteht eine Volumenvergrößerung des Öles. Am Transformator ist also eine Hilfseinrichtung — das Ausdehnungsgefäß — für einen Temperaturbereich von +35° C bis −40° C vorzusehen. Gesonderte Ausdehnungsgefäße für die Durchführungen werden im allgemeinen mit dem Hauptausdehnungsgefäß konstruktiv in Verbindung gebracht.

Man wird es dem Berechner und dem Konstrukteur nicht verübeln, wenn er zuerst mal ohne Rücksicht auf erforderliche Hilfseinrichtungen sein Augenmerk auf den aktiven Teil des Transformators richtet, um eine möglichst große Grenzleistung in dem zur Verfügung stehenden Raum unterzubringen. Was soll nun mit der Unter-

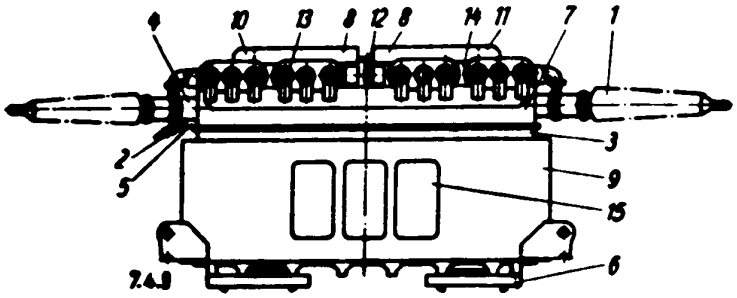


Bild 9. Seitenansicht des Transformators

1 Obersp.-Durchführung; *2* Untersp.-Durchführung; *3* Transformatorkasten; *4* Anbau für Obersp.-Durchführung; *5* Anbau für Untersp.-Durchführung; *6* Fahrgestell mit Rollen und Zugösen; *7* Transformatordeckel; *8* Hilfsausdehner; *9* Hauptausdehnungsgefäß; *10* Ausdehnungsgefäß für Obersp.; *11* Ausdehnungsgefäß für Mittelsp.; *12* Buchholzrelais; *13* Propellerlüfter; *14* Kühler; *15* Raum für Schalter

bringung des Ausdehnungsgefäßes werden? Die Aufstellung des Gefäßes neben bzw. oberhalb des Transformators mit seiner vollen Größe ist an sich möglich; der Begriff der Wandertype ist jedoch kaum mehr anwendbar. Am Aufstellungsort ist eine zusätzliche Montage erforderlich. Die hierzu erforderliche Zeit ist zwar nicht so beträchtlich, daß sie am Ende ausschlaggebend wäre. Von einer eleganten konstruktiven Lösung dürfte andererseits kaum mehr die Rede sein, wenn nicht auch gleichzeitig eine weitere Leistungssteigerung mit der Anordnung verbunden ist.

Ein anderer Weg wurde beschritten, der einerseits Materialersparnis erbrachte und andererseits dem gesamten Fahrzeug eine größere Steifheit verlieh. Zur Unterbringung des Ausdehnungsgefäßes wurde gleichzeitig der Fahrzeugkäfig, in dem der aktive Teil des Transformators untergebracht ist, benutzt. Der Fahrzeugkäfig ist bekanntlich zwischen den beiden Drehgestellen aufgehängt. Oberhalb des Transformators, also über dem Kühler, ist unabhängig vom Hauptkasten ein Hilfsausdehnungsgefäß außerhalb des Eisenbahnprofils angeordnet. Beide Ausdehnungsgefäße stehen miteinander in Verbindung, erstens um über eine Überlaufleitung das Öl vom Hilfsgefäß in das Hauptgefäß ablaufen zu lassen, und zweitens wird mit Hilfe einer Pumpe der Transport des Öles vom Hauptgefäß zum Hilfsgefäß durchgeführt. Die Pumpensteuerung erfolgt automatisch in Abhängigkeit vom Öl-

stand des Hilfsausdehnungsgefäßes. Es enthält etwa die verdrängte Ölmenge für einen Temperatursprung von 15 bis 20° C.

Bewegliche Ölleitungen verbinden das aus zwei Teilen bestehende Hilfsausdehnungsgefäß. Enthalten sind ferner die besonders angeordneten Gefäße für die Durchführungen. Damit hat sich eine Konstruktion herausgebildet, die auf günstige Raumausnutzung schließen läßt und der Gesamtkonstruktion ein gutes Aussehen verleiht.

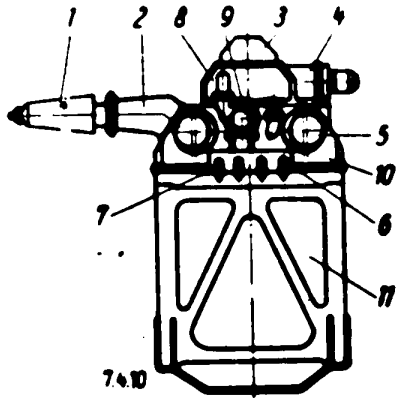


Bild 10. Vorderansicht des Transformators

1 Mittelsp.-Durchführung
2 Anbau für Mittelsp.-Durchführung
3 Blähmembraner
4 Lüfteraggregat
} beim Transport abgenommen;
5 Obersp.-Durchführung; 6 Untersp.-Durchführungen; 7 Anbau für Untersp.-Durchführungen;
8 Kühler; 9 Pumpe für Ölumlauf; 10 Transformatordeckel; 11 Transformatorkasten

3.2 *Die konstruktive Anordnung der Durchführungen am Kastendeckel*

Die großen Transformatoreinheiten haben gewöhnlich drei Wicklungen mit den Leerlaufspannungen 220/110/10 bzw. 6 kV. Die konstruktive Unterbringung der notwendigen Durchführungen, möglichst innerhalb des Eisenbahnprofils angeordnet und montagemäßig möglichst einfach, bereitet ebenfalls beträchtliche Schwierigkeiten.

Verhältnismäßig günstig steht es mit den vier 220-kV-Durchführungen. Sie sind am Deckel auf jeder Stirnseite des Transformators je zwei in Längsrichtung angeordnet.

Die 110-kV-Durchführungen lassen sich leider innerhalb des Bahnprofils nicht unterbringen. Sie müssen erst am Aufstellungsort anmontiert werden. Beträchtliche Schwierigkeiten bereitet dabei die Verlegung der einzelnen Ableistungen seitlich am Transformator.

Es kann weiter als Vorteil für die Montage angesehen werden, daß die Niederspannungsdurchführungen am Deckel stirnseitig zwischen den 220-kV-Durchführungen untergebracht werden konnten. Damit ist es gegebenenfalls nicht notwendig, das gesamte Öl aus dem Transformator und dem Hauptausdehnungsgefäß zu entfernen, sondern nur beschränkt abzulassen, so daß die gesamte Wicklung unter Öl stehenbleibt.

3.3 Verbesserung der isolierten Kernquerschnitte

In diesem Zusammenhang sei auch auf einige fertigungstechnische Verbesserungen beim Zusammenschichten der Eisenkerne hingewiesen. Wie bereits erwähnt, ist Wert darauf zu legen, den Eisenkernquerschnitt zwecks besserer Kühlung und Herabsetzung der Gefahr des Eisenbrandes isolationstechnisch zu unterteilen.

Innerhalb der Kanäle, die sich in der Längsrichtung des Transformators erstrecken, sind Abstandsstücke zu legen, so daß eine einwandfreie Querschnittspressung des Kernes ohne galvanische Verbindung zwischen den Paketen oder indirekt durch Bolzenschlüsse vermieden wird.

Zu diesem Zweck dienen Preßspanstreifen, die in gewissen Entfernungen mit Leinenbändern verklebt sind. Der Öltransport sowie die Wärmeabfuhr werden durch diese Maßnahme nicht beeinflußt. Direkte oder indirekte Eisenverbindungen bei

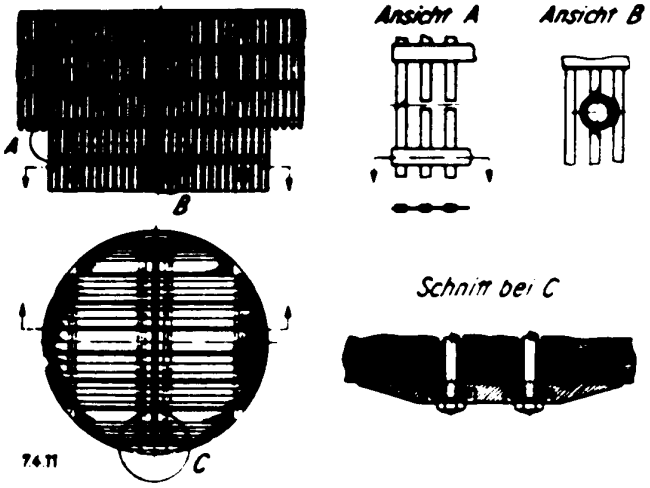


Bild 11. Die Isolierung der Teilquerschnitte

der Montage durch die Bolzen werden weitgehend dadurch verhindert, daß zentrisch um die Bolzenlöcher isolierte Distanzringe innerhalb der Eisenpaketkanäle vorgesehen sind.

Um die Montagearbeiten bei der Einschichtung des oberen Joches zu erleichtern, ist der Jochquerschnitt nach den Seiten hin abgestuft. Die Spulendruckplatten sind dieser Jochform angepaßt und erhalten im Querschnitt gesehen eine V-Form. Durch Eintreiben von Keilen zwischen Joch und Druckplatten werden sie verspannt.

Eine besonders gefährliche Stelle im Sinne des Spannungsüberschlages ist der Abstand zwischen den Spulenumleitungen der 220-kV-Wicklung und den mit Weichpapier isolierten Druckplatten. Dieser Abstand ist durch Hochkröpfen der Druckplatten und durch Anbringung von Winkelringen wesentlich vergrößert worden. Auch diese konstruktive Maßnahme, raumsparend ausgeführt, berücksichtigt alle die hier auftretenden Gesichtspunkte: die Spannungsfestigkeit zwischen Wicklung und Druckplatten, die Beherrschung der Kurzschlußkräfte im Betrieb und die Montage des Transformators in ausgezeichneter Weise.

3.4 *Erhöhung der elektrischen Spannungsfestigkeit zwischen Wicklung und Wicklungsdruckplatten*

Von besonders großer Bedeutung sind die Isolationsprobleme derartiger Transformatoren, die eine besondere Beachtung verdienen. Es soll hier nur auf einige wichtige Punkte hingewiesen werden.

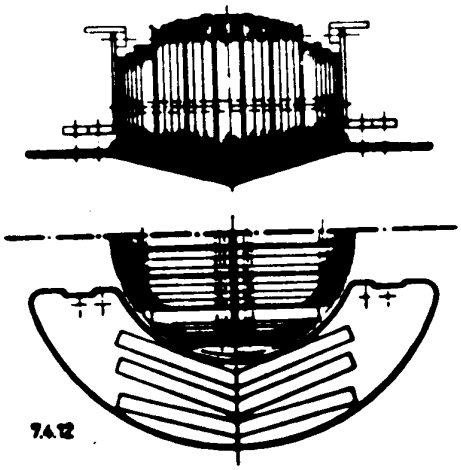


Bild 12. Spulendruckplatten am oberen Joch

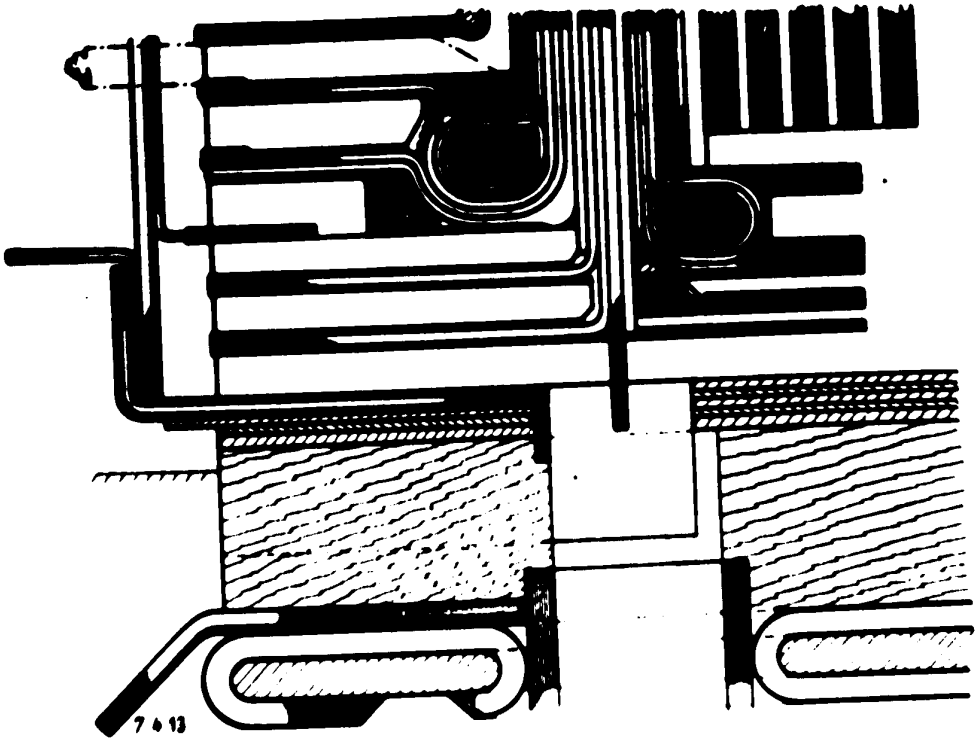


Bild 13. Wicklungsausschnitt

Im Vordergrund stehen naturgemäß die Wicklungen selbst. Über die Hauptisolation und über die Lagenisolation ist nicht viel zu sagen. Es wird die Feststellung gemacht, daß die Auslegung bekannt ist und, mit genügender Sicherheit versehen, ausgeführt wird. Im vorigen Abschnitt wurde bereits der Abstand Wicklung — Spulendruckplatten erwähnt und die Maßnahmen auf der einen Elektrodenseite erörtert. Zum Schutze der einzelnen Wicklungslagen sind gewöhnlich Schirmringe, auch unter dem Namen Strahlungsringe bekannt, vor-

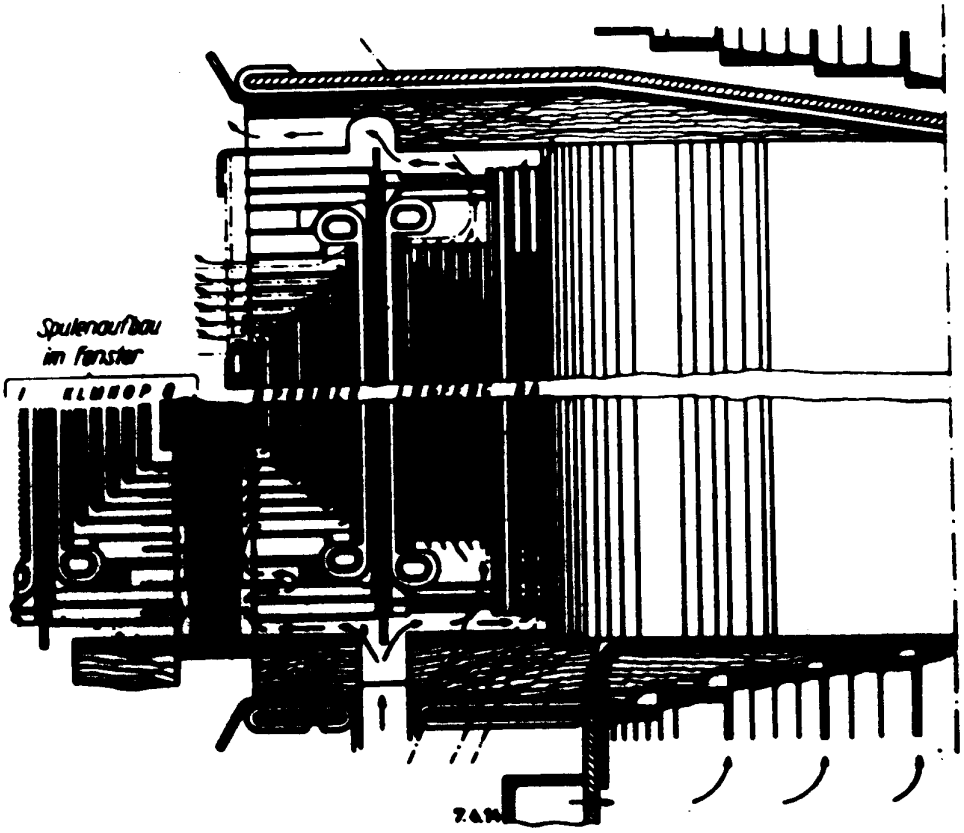


Bild 14. Gesamtwicklung

gesehen. Diese Schutzringe bzw. die darunterliegenden Endwindungen der Lagen sind besonders gefährdet und bilden in den meisten Fällen die Gegenelektrode zu den Spulendruckplatten. Eine besondere Betrachtung muß der Form dieser Ringe gewidmet werden. Die Form wurde so gewählt, daß eine ausgeprägte Schutzwirkung in axialer und radialer Richtung gewährleistet wird. Nach den Rändern der Hauptisolation hin wurde weitgehend die Form der bekannten „Rokowsky-Elektroden" berücksichtigt und durch die Fiederung der Isolation auftretende Zwickel möglichst günstig verlegt. Neben der Form der Schutzringe spielt naturgemäß ihr Isolationsauftrag eine beachtliche Rolle. Es ist somit sehr zweckmäßig, zwei Teile der Hauptisolation gegensätzlich um den Ring zu ziehen. Die Anlenkung des Schutzringes erfolgt im Schatten des elektrisch wirksamen Haupt-

feldes nach der Seite des Hauptisolationskanals hin. Die Anschlüsse sind verteilt auf dem Wicklungsumfang angeordnet.

Die Auflagefläche des Schutzringes überdeckt bei der praktischen Ausführung etwa zwei Lagen, um eine günstige Drückübertragung der axialen Kräfte weitgehend zu gewährleisten.

Die Endwindungen der übrigen Lagen bestehen aus einem oder mehreren parallelgeschalteten Profildrähten mit starken Abrundungen in axialer Richtung. Die Lagenisolation wird dabei möglichst weitgehend um die Endwindungen herumgezogen. Die kaum vermeidbaren Zwickel werden somit weitgehend aus der Zone der elektrischen Feldkonzentration verlegt.

Mit dieser Anordnung ist es gelungen, Glimmerscheinungen mit anschließender Kriechwegbildung weitgehend zu vermeiden.

Weitere Grundlagenforschung auf diesem Gebiet zu betreiben wird als unbedingt notwendig angesehen.

4. Isolationsprobleme

Wie bereits anfangs erwähnt, wurde zur leichteren Lösung des Erwärmungsproblems eine Zwangsumlaufkühlung des Öles durch die Eisenkernkanäle und durch die gesamte Wicklung vorgesehen. In diesem Zusammenhang entstehen wiederum eine große Anzahl Probleme, insbesondere auf dem isolationstechnischen Gebiet, die gemeinsam aufgezeigt und behandelt werden sollen.

Verfolgt man zuerst einmal den Ölstrom zur Wicklung, der durch eine besondere Ölintrittsrohrleitung auf jeder Breitseite des Transformators vorgesehen ist, so ist festzustellen, daß unterhalb und oberhalb der Wicklung je ein ringförmiger Kühlmittelsammelkanal vorgesehen ist.

Diese Sammelkanäle sind durch mehrere — auf jeder Längsseite zwei — Ein- und Ausflußrohre aus Isolationsmaterial mit den Öleintrittsrohrleitungen verbunden. Der Ölstrom wird von vornherein gleich so gelenkt, daß man für alle Wicklungen angenähert gleiche Temperaturen erhält. Das Öl strömt zuerst in radialer Richtung zum Kern nach innen und außen, um dann umgelenkt in die einzelnen Wicklungskühlkanäle einzutreten. Am oberen Ende verläßt das Öl die Wicklung auf zwei Wegen, nämlich über die Ölsammelkanäle, wie beim Eintritt unten, und radial nach außen auf der Längsseite des Transformators direkt in den freien Kastenraum, um danach von besonderen Absaugrohrleitungen in Richtung Kühler und Pumpe weitergeleitet zu werden.

Von Bedeutung für den Ölstrom ist das Vorhandensein eines Zylinders um den gesamten Spulenkörper aus Isoliermaterial, der in der konstruktiven Anordnung und Herstellung verschiedenen Anforderungen entsprechen muß. Der Zylinder besteht in der Längsrichtung aus mindestens drei Teilen. In der Nähe der Ableitungen sind am Ende des Zylinders Winkelringe vorgesehen, um die Kriechwegbildung weitgehend zu verhindern. Selbstverständlich sind die Druckplatten papierisoliert und an den Rändern stark abgerundet.

Die zwischen den Schenkeln eingesetzten Winkelkragen sollen die auftretenden elektrischen Ladungen längs des Ölsteuerzylinders vermindern, unterbrechen und die Kriechwegbildung, insbesondere beim Anlegen der Prüfspannung, unterbinden. Die Klärung des Problemes der elektrischen Aufladungen und Entladungen innerhalb einer Wegstrecke zwischen zwei Elektroden mit verschiedenen Potentialen wird als dringende Aufgabe im Sinne der Grundlagenforschung angesehen.

4.1 Die Isolation zwischen den Schenkeln

Die Isolationszylinder dienen gleichzeitig zur Isolierung zwischen den einzelnen Phasenwicklungen und zwischen Phasenwicklung und den Hilfskernen. Sie werden aus einem dünnen Preßspanzylinder mit aufgewickeltem Papier hergestellt. Die Umleitungen der 220-kV-Wicklungen werden mit wesentlich verstärkter Isolation durch einen Schlitz des Isolationszylinders herausgeführt. Die Abdichtung erfolgt durch strahlenartiges Aufkleben von gefiedertem Papier. Die Ableitungen müssen an dieser Stelle als Durchführungen besonderer Art betrachtet werden.

4.2 Die Wanddurchführung für die Mittelspannung: die Ableitungen

Bei der Weiterentwicklung von Großtransformatoren spielt neben der günstigsten Raumausnutzung zum Einbau des aktiven Materials die Verlegung der Ab-

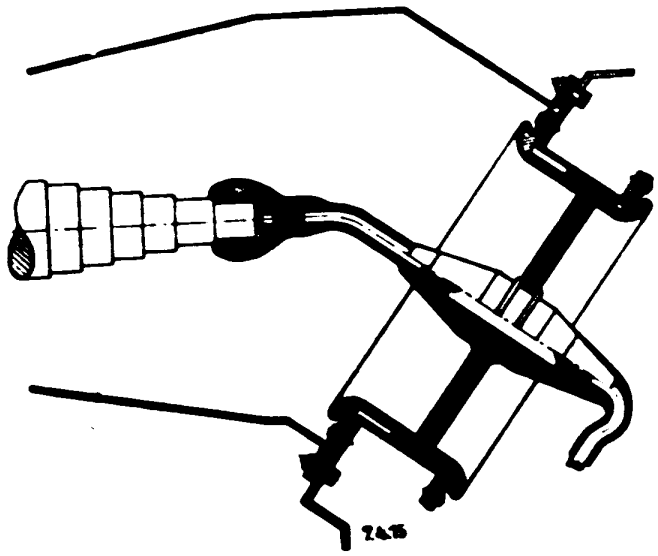


Bild 15. 110-kV-Wanddurchführung

leitungen sowie die Anschlüsse an den Durchführungen und die konstruktive Ausbildung der Durchführungen eine erhebliche Rolle. Da bereits der Kollege *Witt* an anderer Stelle eine ausführliche Behandlung dieses Themas gegeben hat, soll hier nur kurz darauf hingewiesen werden.

Im Gegensatz zu den 220-kV-Durchführungen müssen die 110-kV-Durchführungen am Aufstellungsort des Transformators angebaut werden. Im Transformatorkasten ist eine weitere Wanddurchführung vorgesehen. Hier treten grundsätzlich die üblichen Probleme der axialen und radialen Spannungsfestigkeit auf. Die Ausbildung von Kriechweglängen längs der Durchführungsplatte bis in den Schatten der elektrischen Felder hinein ist keine Seltenheit.

Die hier gewählte Sicherheit ist hoch zu veranschlagen, sie liegt etwa auf 1,9 der Prüfspannung. Es liegt nahe, für die konstruktive Durchführung ein möglichst exaktes Zylinderfeld zu erzeugen, da hier die geringsten und klar beherrschbaren Feldbeanspruchungen auftreten. Der Leiter erhält einen in axialer Richtung

gesehen abfallenden Isolationsauftrag. Die Gegenelektrode besitzt einen großen isolierten Abschirmzylinder für den Deckelrand und die Befestigungsschrauben. Der Anschluß des Durchführungsbolzens mit der eigentlichen Durchführung ist tulpenartig ausgebildet und mit einem starken Isolationsauftrag aus Weichpapier versehen.

Diese Art des Anschlusses, nämlich daß die Tulpe und die Ableitung eine gemeinsame, durchgehende Isolation besitzt und zweckmäßig geformt ist, hat sich vorzüglich bewährt.

Abschließend sei bemerkt, daß im Aufbau eines Großtransformators ein abgestufter Isolationspegel vorgesehen werden muß und davon einzelne Werte unter Berücksichtigung der Streuung etwa wie folgt sein sollten:

Bei einer Prüfspannung eines 220/110-kV-Leistungsformators $Ug = 440/220$ kV ergibt sich

1. Minimale Durchschlagspannung der 110-kV-Ableitungen = $(1{,}25 \cdots 1{,}3)\ Ug$.
2. Überschlagspannung der 110-kV-Wanddurchführungen = $(1{,}5 \cdots 2)\ Ug$.
3. Minimale Durchschlagspannung der 220-kV-Ableitungen = $(1{,}2 \cdots 1{,}25)\ Ug$.
4. Minimale Überschlagspannung der 220-kV-Wicklung nach Erde = (1,15 bis 1,2) Ug.
5. Minimale Überschlagspannung der Lagenisolation = $(1{,}3 \cdots 1{,}4)\ Ug$.
6. Minimale Überschlagspannung der Hauptisolation = $1{,}4\ Ug$.

5. Zusammenfassung

Es wurde ein Überblick über einige Probleme des Großtransformatorenbaues gegeben, die einen bescheidenen Teil darstellen, die im Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" bearbeitet wurden bzw. weiter in der Entwicklung stehen. Die Einzelprobleme, die in der nahen Zukunft bearbeitet werden müssen, sind außerordentlich groß. Von ganz besonderer Bedeutung aber ist die erforderliche Grundlagenforschung, die gemeinsam mit der Entwicklung am gleichen Ort durchgeführt werden muß und die in der vergangenen Zeit vorderhand in beängstigender Weise vernachlässigt worden ist. Die hierfür notwendigen Finanzmittel sind leider nicht zu umgehen. Sie wirken sich jedoch zu gegebener Zeit in erheblichem Maße aus. Es sollen daher alle jene berufenen Stellen zur intensiven Mitarbeit aufgerufen werden, die die mit der Weiterentwicklung verknüpfte Grundlagenforschung auf breiter Basis fördern können, um den Stand der Technik und damit den Lebensstandard unseres Volkes zu erhöhen.

7.5 Vereinheitlichung im Transformatorenbau und Anwendung von Aluminiumwicklungen

Dipl.-Ing. *W. Hörcher*, Berlin

1. Gründe für die Vereinheitlichung

Wenn man die nach den DIN-Normen möglichen Typen von Netz-Leistungs-Transformatoren abzählt, so kommt man bereits auf die Zahl von 393, wenn nur Öltransformatoren im Leistungsbereich bis 40 MVA berücksichtigt werden. Dies ergibt sich durch die Kombinationen der Leistungen, Reihenspannungen, Kühlarten, Ausführungen mit oder ohne Ausgleichwicklungen sowie mit oder ohne Stufeneinstellung unter Last (s. Tafel 1). Daraus kann man erkennen, daß eine Vereinheitlichung zwar außerordentlich nottut, daß es aber eine recht schwierige Aufgabe sein wird.

Die wirtschaftlichen Vorteile, die jede Vereinheitlichung mit sich bringt, sind klar und allgemein bekannt.

Man kann sie unterteilen in betriebstechnische (für den Abnehmer), fertigungstechnische (für den Hersteller) und gesamtwirtschaftliche Vorteile. Zur ersten Gruppe gehören: Auswechselbarkeit der Transformatoren verschiedener Hersteller und — wenn die Vereinheitlichung genügend weit getrieben wird — Austauschbarkeit wichtiger Bauteile, wie Kern, Wicklungen, Kessel bei Instandsetzungen in Werkstätten der Abnehmer. Die Vorteile für den Hersteller bestehen in erniedrigten Unkosten, da in größeren Stückzahlen gefertigt werden kann — soweit wenigstens auch gewisse bürokratische Hemmnisse beseitigt werden, die allerdings beachtlich sind —, ferner in Spezialisierungsmöglichkeiten, z. B. können Kessel in Sonderwerkstätten für mehrere Transformatorenwerke gemeinsam wirtschaftlich hergestellt werden. Die Vorteile, die man nur gesamtwirtschaftlich sehen kann, sind vielleicht die größten und zahlreichsten. So sind erhebliche Lieferzeitverkürzungen möglich, weil Normaltypen beinahe ohne Risiko auf Verdacht gebaut werden können, bei Eingang entsprechender Bestellungen werden sie sofort abdisponiert, im allgemeinen brauchen sie also nicht etwa auf Lager zu gehen. Die Hersteller können ihre Fabrikationsprogramme aufteilen, so daß der einzelne eine verringerte Typenzahl übrigbehält, jedoch so, daß die Grenzen ohne Schwierigkeiten den Zeitbedingungen laufend angepaßt werden können. Damit wird es aber auch leichter, das Gesamtauftragsvolumen nach der Lieferkapazität zu steuern.

2. Umstände, die die Vereinheitlichung erschweren

Bedeutender und interessanter sind nun allerdings diejenigen Umstände, die einer gründlichen Vereinheitlichung erschwerend im Wege stehen. Diese können nur gesamtwirtschaftlich gesehen werden, sie liegen zum Teil in der Hand des Abnehmers und sind fast gänzlich der Verfügung des Herstellers entzogen.

Tafel 1. Öltransformatoren bis 40 MVA nach DIN

Leistung kVA/MVA	Ospg.-Reihe [kV]	DIN-Nr. und Lüftungsart	Ausgleichwicklung	Lastregler	Typenzahl
30 50 100 125 160 200	10 20 30	42502 S	ohne	ohne	15·3 = 45
250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600	10 20 30	42510 S			
2 2,5 3,15	10 20 30	42504 S	ohne / mit	ohne / mit	3·3·2·2 = 36
4 5	10 20 30 60				2·4·2·2 = 32
6,3 8 10	10 20				3·5·2·2 = 60
12,5 16 20 25 31,5	30 60 110	42506 S / 42508 F, FU, WU			5·5·2·2·2 = 200
40		—			1·5·2·2 = 20

Die offenbarsten Hemmnisse sind die Daten der vorhandenen Netze, die sich leider nicht nach genormten Gesichtspunkten entwickelt haben, aber auch Daten bereits vorhandener Maschinen und Transformatoren. Hier wird der Übergang auf Normtypen oft nur durch einschneidende und darum teuere Maßnahmen möglich, die der Betrieb zu entscheiden und zu verantworten hat. Besonders unglücklich ist es, wenn viele Transformatoren abnormale Daten haben, die vielleicht gar nicht im Interesse des Netzbetriebes liegen, z. B. ungewöhnliche Schaltgruppen, niedrige Kurzschlußspannungen oder Anzapfungen auf der Unterspannungs- statt Oberspannungsseite liegend, und wenn dann ein oder einige neue Transformatoren zur Netzerweiterung in Betracht kommen, wobei meist Parallelbetrieb verlangt wird.

Daß auch bauliche Unterbringungsmöglichkeiten eine beachtliche Rolle spielen können, vermutet man beinahe gar nicht. Diese Schwierigkeiten hängen aber gerade bei kleinen Einheitstypen mit den Proportionen von Grundfläche und Höhe zusammen, da diese kleinen Transformatoren vielfach in vorhandenen Räumen untergebracht werden sollen.

Eine der schwerwiegendsten Tatsachen sind die von VDE abweichenden Bedingungen, besonders der zugelassenen Übertemperaturen der meisten Auslandsvorschriften. Dabei beträgt der häufigste Unterschied 10° C, aber auch andere Werte kommen oft genug vor. Es ist klar, daß man nicht etwa die nächst größere Type anbieten kann, denn damit würde man auf jede Wettbewerbsfähigkeit mit den ausländischen Herstellern von vornherein verzichten. Ebenso wichtig sind die anderen Nennspannungen der ausländischen Normen. Schon die Spannung von 35 kV, die im östlichen Ausland häufig ist, läßt sich nicht in der gegebenen deutschen Reihe 30 unterbringen, nicht einmal bei den Durchführungen. Viel ernstere Schwierigkeiten bereitet es natürlich, die höheren Spannungen unterzubringen, wie 120, 132, 150, 240 kV. Der Fragenkomplex Export, Wettbewerb, Typenbeschränkung wird damit sehr schnell entschieden. Sogar Sonderwünsche, auch solche, die außerhalb jeder Norm liegen, muß man bei Abnehmern des Auslandes — ganz im Gegensatz zu denen des Inlandes — in der Regel erfüllen.

Eine Bedingung stellen zur Zeit so gut wie alle Auslandsabnehmer: Als Wicklungsmetall für Transformatoren kommt nur Kupfer in Frage. Das zwingt zu Überlegungen, mit denen wir uns noch eingehend beschäftigen müssen. Dabei wird sich zeigen, daß der Aluminiumtransformator andere Abmessungen verlangt, als sie in der Reihe der Kupfertransformatoren vorkommen. Da beide Typen nebeneinander gefertigt werden müssen, erschwert dies die Vereinheitlichungsbestrebungen außerordentlich.

Aber es gibt noch mehr unausweichliche Umstände solcher Art. Eigentümliche Umstellungen im Laufe der nächsten Jahre muß besonders die Einführung der Texturbleche verursachen. Denn diese führen zu geänderter Bemessung und außerdem zu ganz neuen Konstruktionen der Kerne. Es läßt sich leicht voraussagen, daß die kleineren Verluste und der kleinere Magnetisierungsbedarf sowie die höhere Sättigungsinduktion dieser Bleche wirtschaftlich erhöhte Beanspruchung verlangen, wobei nur fraglich ist, ob man die bisherigen Leerlaufverluste und Leerlaufströme wieder voll anstreben soll, um Wicklungsmetall und Wicklungsverluste zu sparen. Näher liegt es, eine Zwischenlösung zu suchen, bei der sowohl die Leerlauf- wie auch Kurzschlußverluste entsprechend fallen. Man kann allerdings gerade deshalb wiederum nicht erwarten, daß Kern- und Wicklungsabmessungen sich mit den Abmessungen der bisherigen Transformatoren zwanglos werden vereinbaren lassen.

Die Tatsache, daß die Preise der aktiven Werkstoffe die Aufteilung derselben und ihrer Verluste im Transformator beeinflussen, ist altbekannt und beinahe wieder aus dem täglichen Bewußtsein verschwunden, weil für gewöhnlich große Änderungen über längere Zeiträume kaum mehr vorkommen und kurzzeitige Schwankungen nicht berücksichtigt werden können. Im Zusammenhang mit großen Werkstoffumstellungen, sei es die Einführung von Aluminium als Wicklungsmetall oder von Texturblechen als Kernwerkstoff, werden aber auch solche Überlegungen wieder besonders aktuell und können die Vereinheitlichung erschweren bzw. zeitlich aufhalten. Die Preise neuartiger Werkstoffe werden sich, neben den normalen

Schwankungen, ebenso wie die technischen Eigenschaften in *einer* Richtung entwickeln. Leider läßt sich noch gar nicht absehen, wie die Preise für Texturbleche sich bei uns einmal einspielen werden.

Auch von inaktiven Teilen her kann man Entwicklungen und Rückwirkungen auf die Auslegung der Transformatoren von Zeit zu Zeit erwarten, so z. B. von den Isolierstoffen und dabei besonders von ihrer Temperaturbeständigkeit. Nur erwähnt sei, daß auch Fortschritte bei den inneren Kühlmethoden und besonders der Rückkühleinrichtungen ihren Einfluß auf die innere Bemessung geltend machen werden.

Die angeführten Punkte können natürlich nicht vollständig sein, jedenfalls erkennt man, daß sie in Wirklichkeit sehr zahlreich und schwerwiegend sind und uns darum bei unserer Arbeit zur Vereinheitlichung sehr zu schaffen machen.

6. Möglichkeiten der Vereinheitlichung

In allererster Linie soll man natürlich bestrebt sein, absolut normale Typen zu bauen und zu verwenden, wie sie die DIN 42500 u. ff. vorsehen. Aus dem vorher Gesagten ergibt sich allerdings, daß dies nicht so sehr in der Gegenwart als in der Zukunft erreichbar ist. Der künftige erwünschte Zustand aber erfordert, daß die gegenwärtigen Bemühungen dieses Ziel ständig im Auge haben. Dabei drängt sich sofort die Frage auf, ob die Zahl von 383 Typen der Netzleistungstransformatoren bis 40 MVA nicht viel zu hoch ist. Zweifellos läßt sie sich erheblich verkleinern, wenn man berücksichtigt, daß bei weitem nicht alle Varianten gleich häufig auftreten. Man kann also die seteneren als abnormal erklären, so z. B. einen 2-MVA-Transformator mit Ausgleichwicklung und Lastregler. Auch gewisse Leistungen kann man streichen bzw. als „möglichst zu vermeiden" in Klammer setzen. Über dieses Vorgehen wird man jedoch sehr geteilter Meinung sein, da aus einer systematisch gestuften Reihe eigentlich eine unregelmäßige Reihe wird. Die Streichungen ergeben sich lediglich dadurch, daß gewisse Typen mehr oder weniger zufällig seltener verlangt werden, was sich aber im Laufe der Zeit auch gründlich ändern kann; dann allerdings kann man gestrichene Typen wieder zufügen ohne die übrige Reihe zu stören, so daß die zunächst einmal vorgenommene Streichung nicht bedenklich erscheint. Wollte man aber radikal vorgehen und in größeren Bereichen durchweg jede zweite Type streichen, so käme man sehr schnell zu der Einsicht, daß die dann unnötig großen Typen, die man im Einzelfall oft wählen müßte, wirtschaftlich nicht durch die erreichte Verringerung der Typenzahl aufgewogen werden könnte. Man sieht aber ebenso leicht ein, daß der durch Vereinheitlichung erzielbare Gesamtgewinn sich nicht in der Festlegung der Betriebsdaten und der äußeren Baumaße erschöpft, man muß auch die in den DIN-Normen nicht festgelegten Innenmaße und die innere Ausführung vereinheitlichen.

Hier kann viel geschehen, um durch Systematik Entwicklungs- und Konstruktionsarbeit zu sparen. Dazu hat man etwa die Bauteile, wie Kern und Kessel, zu vereinheitlichen. Bestrebungen dieser Art sind zwar nichts grundsätzlich Neues, so hat jedes Werk seine Durchmesserreihe für die Kerne und auch die Fensterabmessungen längst festgelegt. Nur fehlt gerade hier meist die Systematik. Es ist am zweckmäßigsten, die Kerndurchmesser nach Normzahlen abzustufen. Dann ergeben sich über ziemlich weite Leistungsbereiche „bedingt ähnliche" Transformatoren. Gewisse Sprünge lassen sich zwar auch dann nicht vermeiden, weil

Einflußgrößen, wie die Füllfaktoren der Wicklungen sich über die Leistungsskala hinweg gleitend ändern, neben Schwankungen, die durch die einzelnen technischen Daten bedingt sind. Alle diese Einflüsse hängen auch vom Entwicklungsstand der Technik und besonders der Technologie ab, sie sind also dauernd im Fluß, so daß es nicht ratsam erscheint, ihretwegen die Normzahlenreihe zu modifizieren. Die Entwicklung einer Leistungsreihe stellt sich danach so dar: Alle Transformatoren mit Normleistung und sonstigen Normaldaten werden unter Verwendung der Kerndurchmesserreihe möglichst günstig entworfen. Dabei zeigen sich einzelne Typen, die als absolut günstig herauskommen, d. h. die auch bei völlig freier Wahl der Kernabmessungen nicht besser ausgelegt werden könnten. Schreitet man von ihnen aus in der Reihe nach vorwärts und rückwärts fort, so findet man dann zunehmend Einbußen. Ein Grund hierfür ist die schon genannte Änderung des Füllfaktors der Wicklungen, denn die Spannung ändert sich mit der Leistung nicht stetig, sondern in wenigen Sprüngen, so daß der Isolationsaufwand *anteilmäßig* nicht gleichbleiben kann. Aber auch der Gesamtfüllfaktor des Kernquerschnitts ändert sich mit der Kerngröße, einmal weil mit der Größe die wirtschaftliche Stufenzahl der Blechbreiten zunimmt, aber auch der Querschnittsverlust durch Kühlkanäle. Beide Einflüsse wirken gegeneinander, so daß die resultierende Füllfaktoränderung des Eisenquerschnitts nicht allzu groß ist. Eine weitere, sehr charakteristische und einschneidende Ursache liegt in der ebenfalls bereichsweise konstanten Kurzschlußspannung, die erreicht werden muß, während die „natürliche" Kurzschlußspannung eine stetige Funktion der Leistung wäre.

Es ändern sich demnach die Kernproportionen von einer Baugröße zur nächsten, bis diese Änderung so groß geworden ist, daß entweder für zwei aufeinanderfolgende Leistungsstufen derselbe Kerndurchmesser Anwendung finden muß, oder aber Kerndurchmesser, die um zwei statt einer Stufe springen. Hier erhebt sich sofort die Frage, wie fein man die Kernreihe stufen soll, um bei gegebener Stufung der Leistungen im Verhältnis 1 : 1,25 möglichst zweckmäßig zu verfahren. Diese Frage ist nicht ganz einfach zu beantworten, weil es eine absolute Lösung hier nicht geben dürfte, denn nur gröbere wirtschaftliche Einbußen lassen sich sofort erkennen und nachweisen. Die natürlichen Wachstumsgesetze führen zunächst — mit den bewußten Einschränkungen — auf eine Durchmesserreihe mit dem Quotienten $\sqrt[4]{1{,}25} = 1{,}06$. Hiernach wäre, wie bisher vorausgesetzt, grundsätzlich jeder Leistungsstufe eine Kernstufe zugeordnet. Vielfach hat man jedoch von vornherein zwei Leistungen auf einen Kerndurchmesser gelegt, wobei also in günstigen Bereichen abwechselnd der eine Transformator zu schlank, der andere zu gedrungen ist und keiner das wirtschaftliche Optimum erreicht. Da dieses flach verläuft, könnte man geneigt sein, die Einbußen als unbedeutend anzusehen. In anderen Bereichen der Leistungsskala entspricht dabei jeder zweite Transformator einer Bestlösung, während die dazwischenliegenden deutliche Mängel aufweisen können. Das leuchtet ein, wenn man bedenkt, daß die 1,25fache Leistung mit demselben Kernquerschnitt wie die 1fache in erster Annäherung gleiche Fensterbreite, aber etwa 1,25fache Schenkellänge erfordert, um dieselbe Kurzschlußspannung zu ergeben. Die Verluste bedingen dann allerdings eine gewisse Korrektur, die aber nicht bedeutend ist. Nun muß man sich aber noch entscheiden entweder für die etwa im Verhältnis 1 : 1,2 zu schlanke oder im reziproken Verhältnis zu gedrungene Type. Da in den verschiedenen Fällen teils die eine, teils die andere

die etwas Vorteilhaftere sein kann, so sind damit Kernproportionen möglich, die sich in recht weiten Grenzen bewegen, was man jedoch zu vermeiden sucht.

Praktisch haben sich auch keine eindeutigen Vorteile der grobgestuften Kernreihe ergeben. Dementsprechend ist im Transformatorenwerk „Karl Liebknecht" bis auf weiteres die Kernreihe der Tafel 2 vorgesehen. Wenigstens für die größeren Kerndurchmesser von 315 mm aufwärts beträgt der Quotient 1,06, wobei zunächst die hervorgehobenen Werte mit dem Quotienten 1,12 als Vorzugsreihe gelten, um im Laufe der Zeit zu entscheiden, ob die weitere oder engere Teilung die größeren Vorzüge bietet.

Tafel 2. Kerndurchmesser [mm]

100	*315*	600
110	335	*630*
125	355	*670*
140	375	*710*
160	*400*	750
180	425	*800*
200	*450*	850
220	475	*900*
240	*500*	
270	530	
290	*560*	

Die Kerndurchmesser dieser Reihe bis 270 mm [illegible] ren Werke der Deutschen Demokratischen Republik gemeinsam [illegible] heitstypen bis 1600 kVA [illegible] fortgeschritten ist. In diesem Bereich hat [illegible] Durchmesser beibehalten. Von 100 kVA aufwärts [illegible] abstufung einer geometrischen Reihe. Dabei [illegible] Durchmesser zwei aufeinanderfolgende Leistungen [illegible] Kern [illegible] gleich der Mittenabstand [illegible] hat in der Schenkellänge ausgewirkt. [illegible] Leistungen auf einen Kerndurchmesser. [illegible] das mit dem Springen der Kurzschlußspannung [illegible] 3,7 [illegible] erklären, aber auch bei Reihe 30 trifft es zu, obwohl hier die Kurzschlußspannung konstant bleibt. Ebenso kommt es einmal vor, daß einem Durchmesser nur eine Leistung zugeordnet ist. Diese Tatsachen erklären sich nach den vorher angestellten Überlegungen und sind demnach zu erwarten gewesen. Völlige Wiederholung der Kernabmessungen für zwei verschiedene Typen der Einheitsreihe kommt im gesamten Bereich der Kupfer- und Aluminiumausführungen nur viermal vor. Für die drei Werke stimmen außer den Durchmessern auch die Fensterabmessungen vollständig überein. Die für das Auswechseln weniger wesentlichen Einzelheiten der Kerne, wie die Anzahl der Querschnittsstufen und die genaue Größe des Eisenquerschnitts, unterscheiden sich noch zwischen den Werken; diese sowie die Preßkonstruktionen der kleinen Kerne völlig gleichzumachen, bleibt evtl. für später. Bevor man dies tut, sollte man allerdings die absolut günstigste Ausführung erarbeiten. Wieweit man auch die Abmessungen der größeren Kerne überbetrieblich vereinheitlichen soll, ist eine gegenwärtig noch offene Frage. Versuche in dieser Richtung hat man noch nicht unternommen. Spätere Vergleiche

der Normalentwurfe der [illegible] Transformatorenfabriken wahrscheinlich die Antwort.

Leichter noch als bei den Kernen läßt sich die Vereinheitlichung der Kessel durchführen. Immerhin ergeben sich 17 verschiedene Grundflächenlichtmaße (und Deckelgrößen) bei 90 verschiedenen Transformatortypen der Einheitsreihe bis 1600 kVA. Vollständige Wiederholungen der Kastenabmessungen kommen dabei wenigstens 20mal vor, und es lassen sich vielleicht noch mehr Ausführungen zusammenlegen. Auch die Ausführungen der drei größten Werke untereinander sind nur hinsichtlich der lichten Abmessungen vereinheitlicht; es bleibt zu prüfen, inwieweit es zweckmäßig ist, bei späterer Gelegenheit auch die Wellenabmessungen, ferner die Konstruktionen, einander völlig anzugleichen. Bei den größeren Typen braucht man daran nicht zu denken, bevor die Kernabmessungen geklärt sind.

Die Wicklungen sind die am wenigsten festzulegenden Bauteile, da an ihnen unmittelbar alle die Variationen der technischen Daten sich auswirken. Aber es erscheint vielleicht möglich, für mehrere Werke völlig gleiche Wicklungen dann zu verwenden, wenn die Daten gleich bzw. normal sind. Dieser Weg ist noch nicht beschritten worden; selbst bei den Einheitstransformatoren hat man sich auf Angleichung der Wicklungsdurchmesser und -längen beschränkt, um die Auswechslung zu gestatten. Eine beliebig weitergehende Vereinheitlichung brächte auch nicht ohne weiteres ersichtliche Vorteile, hingegen sogar gewisse Schwierigkeiten, wenn die technologischen Verfahren und Einrichtungen der Werke verschieden sind. Trotzdem bleibt eine schrittweise Angleichung erstrebenswert, indem man wenigstens diejenigen Ausführungen, die nur belanglose und zufällige Unterschiede aufweisen, vollends gleichmacht. Das dürfte zwar bei den größeren Typen einstweilen nur in sehr wenigen Fällen zutreffen, um so mehr aber sicherlich bei den Einheitstransformatoren bis 1600 kVA. Völlig gleiche Abmessungen der Wickelzylinder und der Drahtprofile für drei große Werke ließen es zu, hierfür optimale Werte zu verwenden, auch wenn sie nicht in einer gegenwärtigen Vorzugsreihe enthalten sind. Deswegen bedarf nicht etwa die Anzahl der Drahtprofile einer Erweiterung. Im Gegenteil bieten sich dabei Möglichkeiten einer Einschränkung ohne Nachteile.

Nachdem sich herausgestellt hat, daß eine umfassende Vereinheitlichung im direkten Vorgehen nicht zu erreichen ist, wird, besonders von den Abnehmern, einer der nächstliegenden Auswege darin gesehen, „Universaltypen" zu bauen, die etwa mehrere Normspannungen wahlweise einzustellen gestatten, oder aber noch weit häufiger gerade vorhandene abnormale Werte eines Netzes mit Normspannungen durch die entsprechende Ausführung der Transformatorwicklungen zu kombinieren. Die Lösung dieser Aufgabe ist in vielen Fällen mit mehr Nachteilen verknüpft, als es dem ersten Anschein entspricht, und diese Art Vereinheitlichung führt von der Vereinfachung oft weit weg und widerspricht dann — für sich gesehen — dem Ziel jeder endgültigen Norm. Aber es muß wohl beachtet werden, daß solche konstruktiv abnormalen Typen, *die jedoch die Normaldaten mit enthalten*, wirksame Überbrückungsmöglichkeiten eröffnen, indem sie die Bereinigung der Netze erleichtern und damit den Weg frei machen für möglichst baldige Verwendung ausschließlich von solchen Transformatoren, die sowohl einheitlich als auch einfach sind. Diese stellen die Endnorm dar und müssen über alle Teil- und Ausweichlösungen hinweg erreicht werden.

Es dürfte aufschlußreich sein, eine Anzahl charakteristischer Beispiele für Spannungsumschaltungen etwas näher anzusehen. Solche Beispiele sind besprochen u. a. [illegible] Sinke [1].

Es mögen einige andere erwähnt sein, die auch die höheren Spannungen betreffen, aber natürlich ebenfalls nur eine ganz geringe Auswahl darstellen [illegible] wird verlangt: 3×2 kV und 2×3 kV, um durch Serien- bzw. Parallel- [illegible] 6 oder 2 bzw. 6 oder 3 kV zu haben. Abgesehen von den Schaltleitungen [illegible] meist keine große Verteuerung. Die Schaltleitungen verursachen jedoch [illegible] Leistungen einen beachtlichen Kupferaufwand mindestens für Um- [illegible] unter Deckel statt Umlötung, und im letzteren Fall mehr, wenn die [illegible] der äußeren Wicklung die umstellbare ist. Umklemmen mittels Schalt- [illegible] Deckel benötigt obendrein mehr Durchführungen und wird im all-

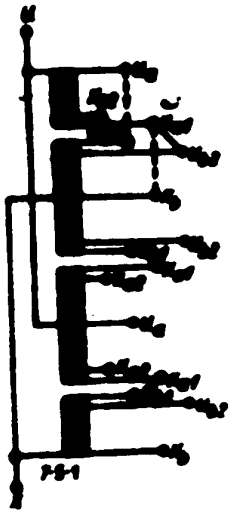


Bild 1. Umschaltung für 11 kV oder 6,6 kV

[illegible] abgeschaut, weil damit die normale Wicklungsanordnung mit Aufteilung [illegible] Richtung auf dem Schenkel aus Gründen der Betriebssicherheit auf- [illegible] müßte. Ein hierbei möglicher Teilkurzschluß würde sonst die Wick- [illegible] stark einseitiger Kraftwirkung zerstören. Schon dieses an sich so ein- [illegible] macht deutlich, wie gewisse, scheinbar ganz natürliche Forderungen [illegible] tiefgreifende Folgerungen für die Gesamtkonstruktion haben kön- [illegible] gleichartige Umschaltmöglichkeit 2×15 kV, also entsprechend Reihe 30, [illegible] schon besondere, wenn auch noch einfache Isolationsmaßnahmen an der [illegible] beider Spulengruppen und gegebenenfalls der Schaltleitungen, da Rück- [illegible] auf die Stoßbeanspruchung zu nehmen ist. Am einfachsten sind natürlich Umschaltungen im Verhältnis $1:\sqrt{3}$ oder etwa dieses Verhältnisses bei gleichzeitiger Änderung der Schaltung von Dreieck auf Stern. Gerade diese letztere Umschaltung entfällt oft. So wurde eine Umschaltung mittels Umsteller von 6,6 auf 11 kV in gleicher Schaltgruppe verlangt. Dafür eignet sich die Anordnung nach Bild 1, wenn infolge großer Leistung genügend viele parallelgeschaltete Spulengruppen sowieso in Frage kommen, so daß sich das elektrische Grundschema axial mehrfach wiederholt und folglich im Strombelag keine zu groben

Ungleichmäßigkeiten längs der Wicklung auftreten. Umlötung ermöglicht jedoch, die Wicklung in genügend viele elektrisch in Reihe geschaltete Gruppen zu unterteilen und läßt sich darum auch für viel kleinere Leistungen anwenden.

Die Umschaltung von 10 auf 15 kV oder 20 auf 30 kV kann man bei mittleren Leistungen nach Bild 2 ohne viel Verlust an Wickelraum durchführen, wobei wegen der richtigen Stromverteilung die beiden mittleren Gruppen zusammen ein Drittel

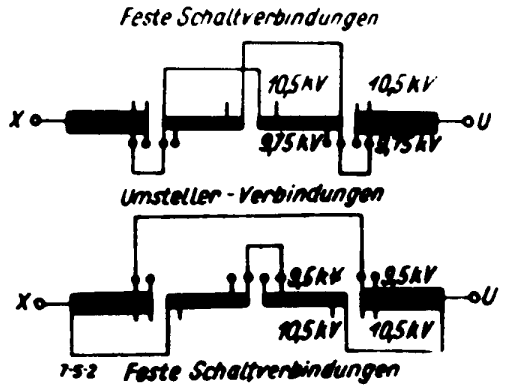


Bild 2. Umschaltung für 30 ± 0,75 kV oder 20 ± 0,5 kV

der ganzen axialen Wickellänge einnehmen müssen und hier Drähte halben Querschnitts oder etwas weniger zu wickeln sind als in den Außengruppen. Falls diese umschaltbare Wicklung die Oberspannungsseite darstellt und außerdem die Forderung besteht, daß sie Anzapfungen haben soll, die für beide Nennspannungen

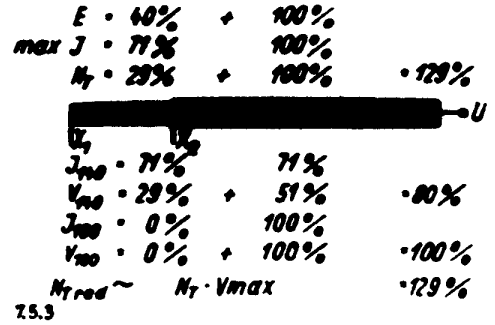


Bild 3. Umschaltung für 154 kV oder 110 kV

dieselbe relative Stufengröße von z. B. ± 5% ergeben, so empfiehlt sich, um hierfür mit normalen Doppel-Mittenumstellern auszukommen, die Nennspannungen nur durch Umlöten abzuändern. Die in Bild 2 gezeigte Lösung hat zwar den Nachteil ungünstig verteilter Lücken im Strombelag vom Standpunkt der dynamischen Beanspruchung. Da aber bei mittleren Leistungen die Gegenwicklung (Unterspannung) meist auf der Wickellänge mehrere elektrisch parallelgeschaltete Gruppen aufweist, entfällt hier im wesentlichen dieser Mangel.

Die Zweckmäßigkeit der meisten Umschaltungen ist überhaupt sehr stark abhängig von der Leistung der Transformatoren, ebenso natürlich von der Spannungs-. Wenn 110 auf 154 kV umzuschalten ist, achtet man darauf, daß die hohe ung nirgends auftritt, wenn man die niedrige eingestellt hat, also löst man gabe nicht lediglich durch Anzapfen einer durchgehenden 154-kV-Wicklung kV. Ein offenes Wicklungsende der gesamten Differenzspannung von empfiehlt sich selbst dann nicht, wenn sein Potential überall innerhalb des dreiecks von 110 kV liegt, weil bei Stoßbeanspruchung an diesem Ende gefährliche Überspannungen auftreten können. Zweckmäßig wählt man die ung nach dem elektrischen Schema des Bildes 4. Nur bei *Umlötung* kann

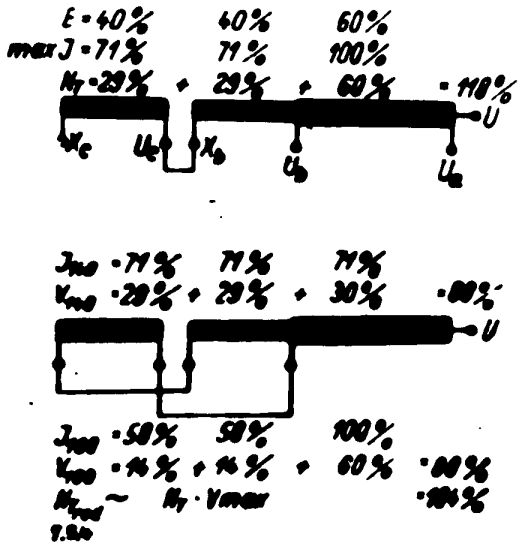


Bild 4. Umschaltung für 154 kV oder 110 kV

ch vielfache Unterteilung in Gruppen mit Teilspannungen gemäß diesem eine Wicklung aus lauter Scheibenspulen beibehalten. Sonst müssen die kV-Gruppen als Lagen über die ganze axiale Länge reichen. Dies führt er Parallelschaltbedingung auf 2×2 Lagen mit Windungsabgleich. Die ung kann als verstärkte Wicklung am Streukanal liegen und die Ein- oder auch den Sternpunkt enthalten. Im letzten Fall wirken die für die Sternwicklung. Man hat dabei aber höhere Stoß- zwischen den Umstellerklemmen zu erwarten. Vorteilhaft aus mecha- in Hinsicht einer homogenen Gesamtwicklung und wegen der ungen auch elektrisch günstig, erweist sich hier jedoch die durch- wicklung, wobei die 44-kV-Schaltlagen weiter außen als die evtl. Stufenspulen für ±5%-Anzapfungen liegen müssen, denn sonst je nach Schaltzustand die Stromverteilung der ersteren unzulässig

klemme kann wieder sowohl am inneren wie am äußeren Wicklungs- In Bild 5 liegt sie an der zweiten Lage von außen gerechnet.

hat die besprochene Schaltweise gegenüber der nur angezapften Wick- den zusätzlichen Vorteil einer wesentlichen Kupferersparnis im Fall

gleicher Leistung für beide Spannungen. Setzt man die Kupfermenge der Oberspannungswicklung gleich 100%, falls diese nur für eine Spannung eingerichtet wäre, so beträgt der Kupferaufwand der angezapften 154-kV-Wicklung 129% und nach der vorgesehenen Schaltung etwa 104% für den Fall gleicher Maximalverluste beider Schaltungen (siehe Bild 3 und 4).

Die Umstellung von 220 auf 200 kV geschieht durch Anzapfung am Lagenübergang, wobei ein Eingangsschild vorhanden und immer mit der Eingangsklemme verbunden sein muß.

Möglich ist aber wohl in den meisten Fällen, die Wicklung je nach Einsatzort der Transformatoren nicht umstellbar, sondern entweder für 220 *oder* 200 kV

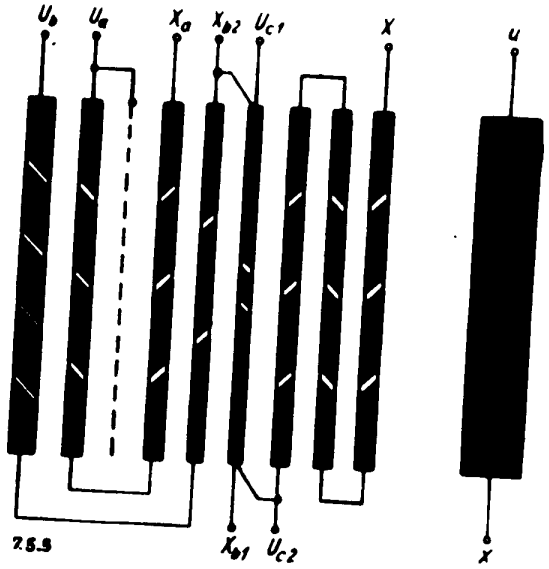


Bild 5. Umschaltung für 154 ± 7,5 kV oder 110 ± 7,5 kV

bzw. 110 *oder* 100 kV auszuführen, wobei die Transformatoren zwar weniger leicht auszuwechseln, dafür aber konstruktiv merklich einfacher sind.

4. Aluminiumtransformatoren

Eine ganze Serie neuer Aufgaben erwächst aus der Umstellung der Wicklungen von Kupfer auf Aluminium. Dabei sollen aus den folgenden Betrachtungen die technologischen Fragen der festen Verbindungen durch Löten, Schweißen und Klemmen ausscheiden und nur Dimensionierungsfragen behandelt werden, da diese im direkten Zusammenhang mit den Bestrebungen um einheitliche Bauarten stehen.

Die elektrischen Leitfähigkeiten von Aluminium und Kupfer stehen bekanntlich im Verhältnis 1 : 1,6, was einer Normzahl entspricht. Dieser glückliche Zufall erscheint zunächst einmal gute Aussichten für gemeinsame Konstruktionen zu bieten, indem man der Konstruktion eines verlangten Aluminiumtransformators die nächstgrößere Kupfertype mit der 1,25fachen Nennleistung zugrunde legt. Ersetzt man in dieser die Kupferwicklung durch eine geometrisch völlig gleiche

7

Da die Kupfertransformatoren verhältnismäßig eisenreich ausgelegt werden mußten, um Kupfer zu sparen, kommt man im Leistungsbereich bis 1600 kVA tatsächlich auf gleiche Kerndurchmesser für die Aluminiumausführungen gleicher Nennleistung. Wegen größerer Wicklungsquerschnitte bedingt dies größere Fensterabmessungen und dadurch etwa 5 bis 10% mehr Kerngewicht und in ähnlichem Maße erhöhte Leerlaufverluste. Aber auch bei dieser Auslegung läßt man zweckmäßig erhöhte Kurzschlußverluste zu — fast durchweg um 20% —; so ergeben sich die Aluminium-Wickeldrahtquerschnitte um etwa 40% (statt 60%) größer

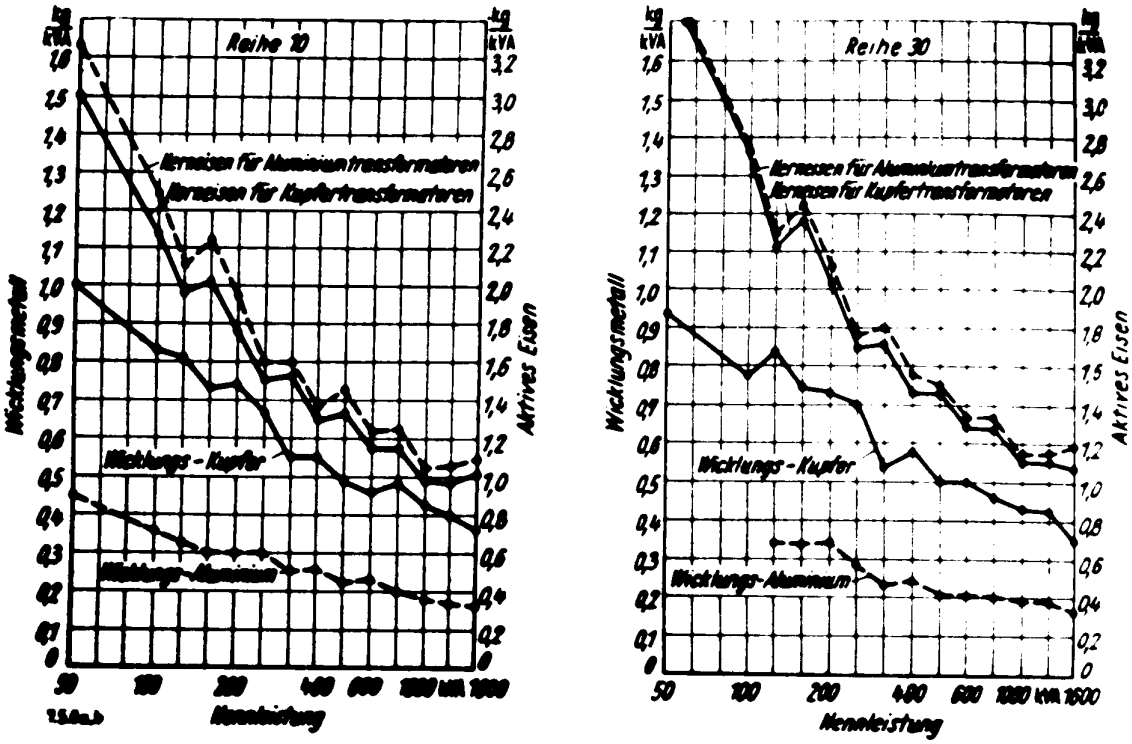


Bild 6a und 6b. Spezifischer Aufwand an aktiven Werkstoffen für Kupfer- und Aluminiumtransformatoren

als beim Kupfer bei nur wenig größeren Drahtlängen. Danach haben die Aluminiumtransformatoren um 5 bis 10% mehr Kernvolumen, aber etwa 45 bis 50% mehr Volumen an Wicklungsmetall als die Kupfertypen, wie es den Preisverhältnissen dem Sinn nach entspricht. Quantitativ richtige Aussagen kann man zur Zeit allerdings nicht erwarten, da die Preise sich erst stabilisieren müssen. Es bleibt noch zu erwähnen, daß die hier verwendeten Aluminiumrunddrähte mit Isoperlonlack und zusätzlich einmal papierisoliert sind entsprechend einem Gesamtauftrag von etwa 0,2 mm, während alle Profildrähte nur Papierisolation in denselben Abmessungen wie die querschnittgleichen Kupferdrähte haben. Die Bilder 6a und 6b geben die Abhängigkeit des spezifischen Aufwands an aktiven Werkstoffen in kg/kVA von der Typengröße wieder, sie lassen einen eckigen Verlauf erkennen infolge der Zusammenlegung je zweier Typen auf einen Kerndurchmesser. Die

„Ecken" für Kern- und Wicklungsgewichte sind aber gegenläufig, so daß sie sich bezüglich des Preises in erster Näherung kompensieren.

Die Auslegung der mittleren Transformatoren bis 10 MVA strebt nach ähnlichen Verlustverhältnissen; nur für die Kurzschlußspannungen der Aluminiumtransformatoren wählt man hier bereits um etwa 15%, in einzelnen Fällen noch mehr, erhöhte Werte gegenüber den Kupfertransformatoren, um die Kurzschlußbeanspruchungen zu vermindern. Beim Parallelbetrieb wird demzufolge der Aluminiumtransformator weniger belastet. Die Zweckmäßigkeit dieser Auslegung ist also ganz davon abhängig, ob bei diesen Leistungen Parallelbetrieb zwischen vorhandenen Kupfertransformatoren und neu hinzukommenden Aluminiumtransformatoren häufig sein wird oder nicht. Im ersten Fall wäre es natürlich richtig gewesen, die Transformatoren für gleiche Kurzschlußspannungen zu bemessen und dazu einen weiteren Mehraufwand an aktivem Material von vornherein vorzusehen. In der Annahme, daß in zahlreichen Fällen Parallelbetrieb nicht in Frage kommt oder sich vermeiden läßt, wäre dieser zusätzliche Aufwand aber nicht begründet; gesamtwirtschaftlich erscheint also die Kompromißlösung richtig. Man kann dies vereinfacht etwa so ansehen, als ob der zusätzliche Mehraufwand an aktivem Werkstoff dann nur im Parallelbetrieb vorhanden ist, ausgedrückt durch verminderte Leistung bei gegebenem Gewicht (also mehr kg/kVA, wobei allerdings der Mehraufwand für diesen Betriebsfall noch etwas reichlicher ausfällt, weil die günstigste Auslegung nicht für diese Leistung, sondern für die Nennleistung erfolgt ist).

Bei den Großtransformatoren von 12,5 bis 40 MVA muß man die Kurzschlußspannungen der Aluminiumausführung noch mehr heraufsetzen, und zwar gerade auch bei den mittleren Reihenspannungen 30 und 60 kV, wo die genormten Kurzschlußspannungen der Kupfertransformatoren wesentlich niedriger liegen als bei Reihe 110.

Für die Leistungen 12,5 bis 25 MVA und die Reihenspannungen bis 60 kV ergeben sich so Kurzschlußspannungen von durchweg 11%, für die Leistungen 31,5 und 40 MVA und alle Reihen sogar 12%. Durch diese Maßnahme und darüber hinaus die Senkung der Stromdichten bis auf etwa 0,6 der Werte für Kupfer lassen sich die dynamischen Beanspruchungen des Aluminiums bis auf höchstens 300 kg/cm² begrenzen, was notwendig ist, da die Festigkeit dieses Metalls schon bei mäßigen Temperaturen unter 200° C, wie sie im Dauerkurzschluß auftreten können, deutlich nachläßt, wobei auch Verfestigungen, die von früheren Verformungen her zurückgeblieben sind, wieder verschwinden. Die großen Wickeldrahtquerschnitte legen es nahe, auch die Kerndurchmesser gegenüber den Kupfertypen zu erhöhen. Als Folge dieser Auslegung liegen die Kurzschlußverluste der Aluminiumtransformatoren kaum noch über den Werten der Kupfertransformatoren.

Die Notwendigkeit der stark erhöhten Kurzschlußspannungen und gesenkten Stromdichten weist schließlich dem Aluminiumtransformator eine Leistungsgrenze zu, oberhalb deren seine Ausführung technisch und wirtschaftlich nicht mehr vertretbar ist. Diese Grenze kann zur Zeit mit etwa 40 MVA angenommen werden.

Nachdem sich bisher herausgestellt hat, daß die Aluminiumtransformatoren über die ganze Leistungsskala hinweg ihre eigene Auslegung erfordern, scheint sich doch noch ein Ausweg, wenigstens für kleine Transformatoren, zu eröffnen, indem man daran denkt, ähnlich vorzugehen, wie es die Hersteller rotierender Maschinen getan haben, nämlich lackisolierte Aluminiumdrähte an Stelle der bespannen

Kupferdrähte anzuwenden und dabei vielleicht gleichen elektrischen Leitwert bei gleichem Raumbedarf der Aluminium- wie der Kupferwicklung zu erzielen. Man muß aber bald einsehen, daß dieser Weg nicht sehr weit führt, denn bei Runddrähten mit Durchmessern über 0,8 mm für Cu und 1,0 mm für Aluminium kommt man trotzdem auf größeren Raumbedarf der isolierten Aluminiumdrähte. Unter dieser Grenze werden Aluminiumdrähte für Transformatorenwicklungen aber nicht verwendet wegen der Gefahr von Drahtbrüchen. Bei Rechteckdrähten ist der mögliche Raumgewinn erst recht unbedeutend. In diesem Zusammenhang muß man aber auch an die Betriebssicherheit denken. Es hat sich zwar gezeigt, daß der Isoperlonlack außerordentlich günstige mechanische Eigenschaften aufweist, er ist vielmals schlag- und abriebfester und verformungsfähiger als der Öllack. Jedoch darf dies nicht darüber hinwegtäuschen, daß die absolut geringe Schichtdicke an sich schon eine Gefahr bedeutet. Mit gewissen Fehlern der Lackschicht muß man doch immer rechnen. Dies können z. B. Poren vom Herstellprozeß her sein. Auch Abschürfungen oder Ritzungen an scharfen Graten kann natürlich die Lackschicht trotz ihrer Festigkeit ebensowenig widerstehen wie das Metall selbst. Dabei entstehen kleine Stellen, die wegen der dichten Lage benachbarter Windungen bei betriebsmäßigen Kurzschlußbeanspruchungen mit größerer Wahrscheinlichkeit zum Schluß führen werden als Fehler bei papierbesponnenen Drähten. Aus diesen Erwägungen heraus und der Verzahlung, auch Isoperlondrähte für die Einheitstransformatoren vorläufig mit zusätzlicher einfacher Papierbespinnung zu verwenden (bei einer Stärke von 0,2 mm). Man muß freilich auf den Einwand gefaßt sein, daß [illegible] Maschinen keine schlechten Erfahrungen mit reinen Lackdrähten [illegible] hat entgegenzuhalten, daß die Kurzschlußbeanspruchungen der [illegible] von Transformatoren viel intensiver und gewöhnlich auch viel häufiger [illegible] als die der Wicklungen von Motoren, und obendrein eine Transformatorwicklung [illegible] vielen aufeinandergestapelten Windungen viel weniger starr [illegible] der Verzahlung, für Transformatordrähte vorläufig eine zusätzliche Papierbespinnung anzuwenden, hat daher ziemlich allgemein Zustimmung, auch von seiten [illegible], gefunden. Dabei verbleibt nach Mitteilung des Walzwerks [illegible] trotz zusätzlichen Arbeitsganges der Herstellung noch eine Verbilligung [illegible] dem leistungsgleichen, nur papierisolierten Kupferdraht.

[illegible] soll man daneben die Aussichten des nur lackisolierten Aluminiumdrahtes prüfen, was an Transformatoren begrenzter Stückzahl im tatsächlichen Betrieb mit allen seinen Einflüssen und dabei besonders der langzeitigen Einwirkungen zu geschehen hat und bereits geschieht.

Ein beachtlicher Unterschied zwischen Transformatoren und rotierenden Maschinen besteht außerdem gerade darin, daß erstere mit Aluminiumwicklungen bis zu Leistungen gebaut werden, die wohl etwa 100mal größer sind als die der Maschinen. Damit treten die Profildrähte im Transformatorenbau viel mehr in den Vordergrund. Bei diesen besteht aber, wie bereits gesagt, gegenüber Runddrähten schon geometrisch keine große Möglichkeit des Raumgewinns durch eine Lackisolation. Außerdem ist deren betriebssichere Herstellung gerade an den Drahtkanten schwieriger und zweierlei Isolation nicht lohnend, so daß man hier z. Z. zweckmäßig ausschließliche Papierisolation, wie bei den Kupferdrähten, anwendet. Doch laufen auch nebenher Einzelversuche mit Wicklungen aus nur lackisolierten Profildrähten. Falls diese für gewisse Anwendungsbereiche Erfolg versprechen, dürfte es sich allerdings empfehlen, die zu lackierenden Aluminiumdrähte

mit größeren Abrundungsradien auszuführen, als die derzeitigen DIN-Normen 46433 für Kupferdrähte vorsehen.

5. Ergebnisse und Ausblick

Unter dem bisher Erreichten muß man zuerst die Abstimmung der Einheitstransformatoren bis 1600 kVA, und zwar sowohl für Kupfer wie auch für Aluminium, für die drei größten Werke der Deutschen Demokratischen Republik — Sachsenwerk Niedersedlitz, Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden und Transformatorenwerk „Karl Liebknecht", Berlin-Oberschöneweide — erwähnen.

Folgende Baudaten wurden dabei einheitlich festgelegt: Kerndurchmesser, Schenkelmittenabstand und Schenkellänge sowie die Windungszahlen und die Wicklungsinnendurchmesser und -längen.

Die Betriebsdaten der Kupfertransformatoren entsprechen dabei den DIN-Blättern 42502 und 42510, während die der Aluminiumtransformatoren zwischen den Werken neu vereinbart wurden, allerdings unter Wahrung mit DIN 42502 und 42510 übereinstimmender Werte der Kurzschlußspannungen.

Besonders erwähnt sei, daß dabei auch die Umsteller neu und völlig einheitlich konstruiert wurden.

Beide Reihen sind konstruktiv abgeschlossen, die Kupfertransformatoren befinden sich in der laufenden Fertigung.

Die Abstimmung der Mittel- und Großtransformatoren mußte sich aus den früher erwähnten Gründen z. Z. auf die der Betriebsdaten beschränken, für Kupfertransformatoren liegen diese in DIN 42504 und DIN 42506 fest, jedoch bereitet man in Westdeutschland Neubearbeitungen vor. Bei uns kamen daher wegen ihrer Dringlichkeit die Aluminiumtransformatoren bevorzugt zur Abstimmung mit dem Ergebnis einer Neufestlegung sowohl der Kurzschlußspannungen wie auch der Verluste an Hand vollständiger Entwürfe. Die Großtransformatoren ab 12,5 MVA wurden als Regeltransformatoren entworfen, und zwar alle mit dem Regelbereich von ±16% in ±9 Stufen gemäß vorläufiger Vereinbarungen mit den Abnehmern, außerdem nur für Ölfremdkühlung. Ihre Daten bedürfen jedoch noch der Bestätigung durch die Fachkommission.

Außerdem befinden sich, allerdings nur in einem der drei Werke — Transformatorenwerk „Karl Liebknecht", Berlin-Oberschöneweide —, Entwurfsarbeiten für Gleichrichtertransformatoren im Gange. Diese haben das Ziel, für die häufigsten Schaltgruppen F 2 und G 2 sowie F 3 und G 3 Normalprimärleistungen und zugehörige Kurzschlußspannungen sowie Verluste festzulegen, die dadurch bestimmt sind, daß die Kerne und Kessel der normalen Netzleistungstransformatoren auch dafür Verwendung finden.

Vor weitergehenden Festlegungen dürfte es sich empfehlen, gewisse Erfahrungen abzuwarten, und insbesondere die neuen Arbeiten des Deutschen Normenausschusses zu beobachten oder vielmehr an ihnen mitzuwirken.

Wie eigentlich überall, so muß man sich ganz besonders auf einem solchen Gebiet wie dem Transformatorenbau unbedingt hüten, Normung und Standardisierung zum Selbstzweck ausarten zu lassen. Beschränkung dem Umfang nach und Nichtbeschränkung der Zeit nach bedingen sich hierbei zu einem guten Teil. Man muß also immer wieder von Zeit zu Zeit die alten Festlegungen nach Art und Umfang hinsichtlich des Standes der Technik und der wirtschaftlichen Bedingungen überprüfen und gegebenenfalls verändern. Dabei werden zweifellos immer mehr

Teilgebiete der Vereinheitlichung zugänglich, aber nie durfte der Fall eintreten, daß beinahe alles in Standards festliegt, da auch die Spezialaufgaben sich immer mehr nach Größe und Zahl entwickeln. Eine der wichtigsten Aufgaben jeder Vereinheitlichung besteht ja mittelbar gerade darin, durch Freisetzen wertvoller Kräfte die Entwicklung zu fördern. Das sind längst bekannte Selbstverständlichkeiten, ebenso selbstverständlich werden sie darum oft übersehen, ihre Berücksichtigung in der Wirklichkeit erweist sich so als recht fragwürdig. Ein praktisches Beispiel zeigt das am besten: Gefordert wird ein großer Transformator mit einer von 154 auf 110 kV umschaltbaren Oberspannungswicklung. Zunächst versucht das Lieferwerk sich von dieser Bedingung durch Verhandlung mit dem Abnehmer frei zu machen „mit Rücksicht auf einfache normale Ausführung". Dies erweist sich als undurchführbar wegen notwendiger Netzumstellung. Der nächste Versuch mit umlötbarer Wicklung auszukommen, wird ebenfalls sehr schnell aufgegeben, da es sich um einen Auslandsauftrag auf größte räumliche Entfernung handelt, wobei es richtig ist, die Spannung mittels Umsteller von außen schalten zu können. So wird eine ausgesprochene Spezialwicklung notwendig mit Schaltspulen in Lagenanordnung. Nicht erforderlich, aber höchst zweckmäßig erscheint es damit, die ganze Oberspannungswicklung in Lagen auszuführen, wie in Bild 5 dargestellt. Das könnte nebenbei wiederum auf die Streitfrage nach der größeren Zweckmäßigkeit der grundsätzlichen Wicklungsanordnung hinführen, nämlich schwingungsfrei oder nichtschwingungsfrei. Da es Hersteller wie Abnehmer gibt, die *nur* die eine bzw. nur die andere als allein richtig ansehen, liegt doch die Frage nach der wirklich und endgültig überlegenen nahe. Könnte man nicht überhaupt diese mitsamt ihrer Konstruktion und Technologie für mehrere Werke zugleich normalisieren? Hier lehrt nun das angeführte Beispiel, daß *eine* Ausführung nicht die *allgemein* überlegene sein wird, es kann im Einzelfall entweder die eine oder die andere überlegen sein, und zwar so eindeutig, daß ein Verzicht darauf lediglich aus Gründen einer Standardisierung nicht vertretbar ist. Die beiden Wicklungsarten unterscheiden sich nämlich nicht nur in hochspannungstechnischer und mechanischer Hinsicht, bei elektrisch parallelen Wicklungsteilen haben sie auch hinsichtlich Stromverteilung und Durchflutungsverteilung grundlegende Unterschiede, die je nach der im gegebenen Fall zu erzielenden Wirkung entweder für die eine oder die andere den Ausschlag geben können. Für die hier gerade vorliegenden Bedingungen verschaffen alle diese Gesichtspunkte und daneben noch die Ausnutzung des Fensterraumes der Lagenwicklung den Vorzug. Unter anderen Voraussetzungen ist man hingegen wegen der Steuerung der parallelen Zweigströme auf die scheibenartig unterteilte Röhrenwicklung geradezu angewiesen; das trifft z. B. bei den Ausführungen nach Bild 1 und 2 zu.

Übrigens verdeutlicht schon ein normaler Regeltransformator, der eine gemischte Wicklung hat, nämlich die Stammwicklung als Röhrenanordnung aus Scheibenspulen und die Stufenwicklung als Lagenspulen, daß beide Wicklungsarten ihre Daseinsberechtigung haben.

Aus wirtschaftlichen Gründen kommen heute in Deutschland seltener als konzentrische Wicklungen Scheibenwicklungen mit abwechselnd Ober- und Unterspannungsspulen vor, aber wiederum in ganz bestimmten Fällen geben gerade sie die schlechthin richtige Lösung ab. Es ist darum notwendig, aus der ganzen naturgebotenen Mannigfaltigkeit der Lösungswege auswählen zu können, um den jeweils richtigen anzuwenden.

Da Normung und Standardisierung einer überragenden wirtschaftlichen Aufgabe entspringen, so erklärt sich auch leicht von der wirtschaftlichen Seite her, daß man ganz verschieden vorgehen muß, je nachdem, ob es sich um die Vereinheitlichung von Gegenständen handelt, deren Herstellung entweder material- oder lohnintensiv ist. Im Extrem des letzten Falles ist die möglichst weit getriebene Zusammenlegung richtig und Übertreibung beinahe unmöglich, während im ersten Fall viel sorgfältigere Überlegungen die gültigen Grenzen erst herausfinden müssen; vor Übertreibungen muß man sich da sehr hüten. Dies darf man vor allem nicht vergessen für den Transformatorenbau, besonders den deutschen (wie überhaupt den Elektromaschinenbau, soweit es sich um die Herstellung einigermaßen größerer Einheiten handelt, bei dem die Werkstoffkosten den größten Anteil ausmachen). Durch diese Tatsache finden die Vereinheitlichungsbestrebungen ihre natürliche Grenze; diese richtig zu erkennen, ist ebenso notwendig wie die tatkräftige Arbeit zur Normung und Standardisierung des zweckmäßig Möglichen.

Im Verein mit der Werkstoffentwicklung und -produktion wird es so gelingen, die vielfältigsten und anspruchvollsten Wünsche unserer Abnehmer im In- und Ausland zu erfüllen.

Literatur

[1] *Zinke, L.:* Umschaltbare Verteilertransformatoren. ETZ-B, 6. Jahrgang (1954), H. 8, S. 319 320.

[2] *Vidmar, M.:* Die Transformatoren. Zweite Auflage. Berlin: Verlag Springer, 1925.

[3] *Richter, R.:* Elektrische Maschinen. 3. Band, Zweite Auflage. Basel/Stuttgart: Verlag Birkhauser 1954.

7.6 Über die Dimensionierung radialgeblechter Transformatoren und Drosselspulen

Dr.-Ing. *G. Dittrich*, Dresden

Wenn man von Schwierigkeiten bei der Berechnung und beim Bau elektrischer Maschinen und Apparate spricht, wird oftmals der Transformatorenbau unterschätzt. Mit der Begründung, daß ja bei Transformatoren alles ruht, wird dieser Zweig der Elektrotechnik als weniger problematisch hingestellt. Zweifellos werden die Verhältnisse, insbesondere die magnetischen, bei rotierenden Maschinen komplizierter und unübersichtlicher, doch muß man andererseits berücksichtigen, daß an den Transformator spannungsmäßig hohe Anforderungen gestellt werden. Und gerade die elektrische Festigkeitslehre fordert neben guten physikalischen und mathematischen Kenntnissen ein gutes Fingerspitzengefühl, damit eine wirtschaftlich vertretbare und zugleich spannungsmäßig sichere Konstruktion entsteht. Darüber hinaus gibt es noch eine ganze Reihe von Aufgaben, die den Transformatorenbauer beschäftigen; z. B. Übergang auf Energieübertragung mit Höchstspannung, Anwendung von kaltgewalzten, kornorientierten Trafoblechen, Verbesserung des Isolationsaufbaus der Hauptisolation, Anwendung neuer Leiterisolationen, Anwendung von Aluminium als Leitermaterial usw. Ein weiteres Problem, das sowohl in die Berechnung und Konstruktion als auch in die Technologie und die Fertigung hereinreicht, ist die Radialblechung von Transformatoren und Drosselspulen. Beim Studium neuerer Literatur trifft man hin und wieder auf den Ausdruck „Radialblechung". Die mit diesem Begriff zusammenhängenden grundsätzlichen Fragen der Dimensionierung sollen in dem nun folgenden Aufsatz behandelt werden.

Unter Radialblechung versteht man eine neue Blechungsart, die neben der üblichen parallelen Anordnung einzelner Bleche bzw. Blechpakete den Blechschnitt von Transformatoren und Drosselspulen in letzter Zeit bei verschiedenen Konstruktionen Bedeutung erlangt hat. Bild 1 zeigt die Gegenüberstellung von parallelen und radialer Blechung. Kurzschlußkräfte und kürzeste Umfangslänge sprechen den Kreis als günstigste Form für die Spulen vor. Der Kreisform muß sich im Hinblick auf sparsamsten Materialverbrauch der Eisenkern zwangsläufig anpassen. Diese Forderung wird bei Parallelblechung durch den Mehrfach-Kreuzquerschnitt erfüllt (Bild 1, a). Die Abstufung richtet sich hierbei nach dem Säulendurchmesser. Bei der radialen Blechschichtung werden die verschieden breiten Bleche zu Sektoren, und diese zu einer runden Säule zusammengesetzt (Bild 1, b). Um die Zahl der verschiedenen Blechbreiten zu begrenzen, wird in der Mitte der radialgeblechten Säule ein Hohlzylinder, der außerdem zur Kühlung der Blechpakete beiträgt, vorgesehen. Die zunächst so banal erscheinende Änderung in der Blechschichtung der Säule bringt jedoch, wie der Aufsatz noch zeigen wird, eine grundlegende Umgestaltung des gesamten Eisenkreises mit sich.

Der Füllfaktor k gibt allgemein das Verhältnis von Eisenfläche zu Fläche des umschriebenen Kreises der Säule an. Bei Radialblechung ist der umschriebene Kreis gleich dem Außendurchmesser der Säule. Der Füllfaktor ist gleichzeitig ein Maß für die mittlere Windungslänge der Wicklung und damit für den Aufwand an Kupfer. Im Hinblick auf ein niedriges Leistungsgewicht [kVA/kg] und die damit verbundene Einsparung von aktivem Material wird für ihn ein möglichst hoher Wert angestrebt. Die bevorzugte runde Form der Spulen legt die Form des Eisenkernes fest. Die idealste Gestalt des Eisens wäre demnach der Kreis.

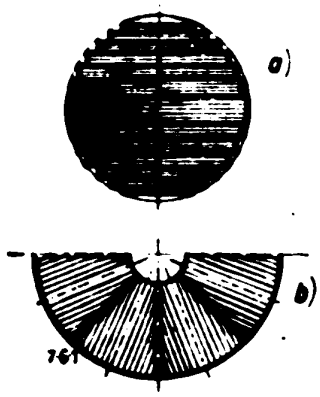


Bild 1. Gegenüberstellung von paralleler und radialer Blechung
a) Parallelblechung, b) Radialblechung

Gelingt es, den von der Wicklung umschriebenen Kreis vollständig mit Eisen auszufüllen, dann wird man die geringste Wicklungslänge und den kürzesten Eisenweg erhalten. Der Füllfaktor ergibt sich nach der Beziehung

$$k = k_{fe}\, k_q, \tag{1}$$

wobei k_{fe} der Eisenfüllfaktor und k_q der Querschnittsausnutzungsfaktor ist. Der Eisenfüllfaktor ist von der Art und Dicke der Isolation sowie von evtl. Blechunebenheiten abhängig. Er liegt etwa zwischen 0,89 bis 0,93 (der kleinere Wert gilt für beklebte, der größere für lackierte Bleche). Der Querschnittsausnutzungsfaktor ist nur von der geometrischen Form der Säule abhängig. Bild 2 zeigt zwei Sektoren einer radialgeblechten Säule. Die gesamte Säule besteht aus s Sektoren. Die mittleren Bleche füllen den gesamten Raum zwischen Außendurchmesser D und Innendurchmesser D_0 aus. Ihre Breite beträgt demnach

$$\frac{D - D_0}{2}. \tag{2}$$

Die Breite des mittleren Blechpaketes ergibt sich zu:

$$p_1 = \frac{D_0\, \pi}{s}. \tag{3}$$

An das mittlere Blechpaket werden seitlich die abgestuften Blechpakete symmetrisch (Bild 2, b) oder unsymmetrisch (Bild 2, a) angeordnet. Die Zahl der Stufen

sei mit z bezeichnet. Die Differenz d zwischen den einzelnen gleichmäßig abgestuften Blechsektoren ergibt sich dann zu:

$$d = \frac{D - D_0}{2} \frac{1}{z}. \tag{4}$$

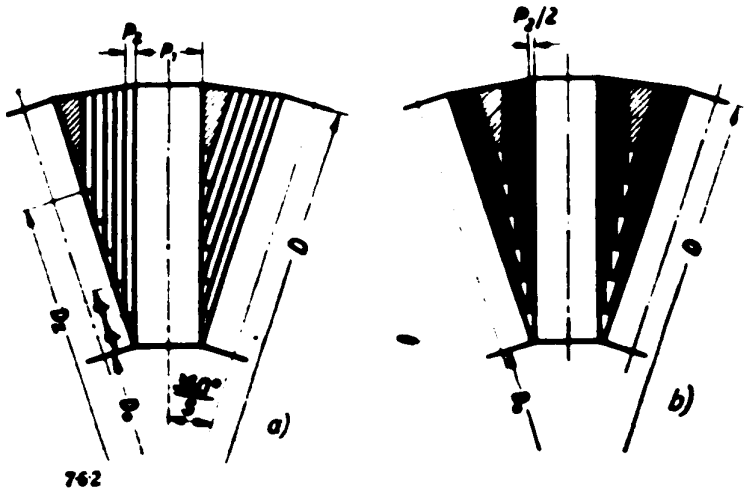


Bild 2. Sektoren einer radialgeblechten Säule
a) unsymmetrisch angeordnet; b) symmetrisch angeordnet

Die Breite der übrigen abgestuften Blechpakete errechnet sich nach der Beziehung:

$$p_{2 \cdots z} = \sin \frac{\pi}{z} d. \tag{5}$$

Der gesamte ausnutzbare Querschnitt ergibt sich mit vorstehenden Beziehungen zu:

$$q = s\left\{p_1 \frac{D - D_0}{2} + 2\left[p_2\left(\frac{D - D_0}{2} - d\right) + p_3\left(\frac{D - D_0}{2} - 2d\right) + \cdots \right.\right.$$
$$\left.\left. \cdots + p_n\left(\frac{D - D_0}{2} - (n-1)d\right)\right]\right\}, \tag{6}$$

$n = 1, 2, 3 \cdots z$.

Wird eine gleichmäßige Abstufung der einzelnen Bleche bis zum äußersten Durchmesser vorgenommen, so würde das schmalste Blechpaket eine Breite von d haben. Bei hoher Stufenzahl und kleinem Säulendurchmesser ergeben sich dabei sehr kleine Luftzwickel zwischen den einzelnen Sektoren. Sollen in die äußeren Zwischenräume Holz- oder Pertinaxkeile zur Herabsetzung des Transformatorengeräusches geschlagen werden, so wird man größere Zwischenräume wünschen. Diese erreicht man durch größere Blechbreite der Außenbleche. Wird der Durchmesser der letzten Stufe (schmalste Bleche) mit D_z bezeichnet, so ergibt sich die Differenz zwischen den einzelnen gleichmäßig abgestuften Blechsektoren zu

$$d = \frac{D_z - D_0}{2} \frac{1}{z - 1}, \quad (D_z < D). \tag{7}$$

Mit Hilfe von Gl. (6) läßt sich nun wieder der ausnutzbare Querschnitt berechnen.

Für eine gleichmäßige Abstufung bis zum äußersten Durchmesser, wie sie den nun folgenden Betrachtungen zugrunde gelegt werden soll, kann man an Stelle Gl. (6) auch setzen:

$$q = s\left\{p_1 \frac{D - D_0}{2} + 2\left[p_2(z-1)\,d + p_3(z-2)\,d + \cdots + p_n(z-(n-1))\,d\right]\right\},$$

$$n = 1, 2, 3 \cdots z \tag{8}$$

und für gleiche Stufen ($p_2 = p_3 = p_n$)

$$q = s\left\{p_1 \frac{D - D_0}{2} + 2\,p_2\,d\left[(z-1) + (z-2) + \cdots (z-(n-1))\right]\right\}. \tag{9}$$

Der Querschnittsausnutzungsfaktor k_q ergibt sich dann zu:

$$k_q = \frac{q}{q_0} = \frac{s\left\{p_1 \frac{D - D_0}{2} + 2\,p_2\,d\left[(z-1) + (z-2) + \cdots (z-(n-1))\right]\right\}}{D^2\pi/4}. \tag{10}$$

Mit Hilfe von (10) wurde der Querschnittsausnutzungsfaktor k_q für folgende Werte für $D = 460$ mm und $s = 8$ ermittelt:

	Stufenzahl z	Querschnittsausnutzungsfaktor k_q	Füllfaktor für $k_{fe} = 0{,}91$ k
a) $D = 460$ mm, b) $D_0 = 92$ mm, c) $D/D_0 = 5$	7	0,850	0,774
	8	0,862	0,785
	9	0,872	0,794
d) $D = 460$ mm, e) $D_0 = 46$ mm, f) $D/D_0 = 10$	7	0,852	0,775
	8	0,869	0,791
	9	0,880	0,802

Wie zu erwarten war, steigt k_q mit wachsender Stufenzahl. Ebenfalls wird mit wachsendem D/D_0 — k_q größer. Im Interesse der Kühlung sollte jedoch der Wert D/D_0 nicht zu groß gewählt werden.

Zum Vergleich mit den vorstehenden Zahlenwerten ergibt sich der Querschnittsausnutzungsfaktor einer 7stufigen *parallel*geblechten Säule mit gleichem Durchmesser beispielsweise zu $k_q = 0{,}84$. Die Werte der *radial*geblechten Säule liegen für den berechneten Fall etwas höher.

Die Berechnung der wirksamen inneren Kühlfläche der radialgeblechten Säule kann sehr einfach erfolgen. Da sämtliche Zwickel zwischen den einzelnen Sektoren sowie der mittlere Kühlkanal eine wirksame Kühlung gewährleisten, kann die innere Kühlfläche gleich der Differenz

$$K_i = q_0 - q \tag{11}$$

gesetzt werden.

Die äußere Kühlfläche ergibt sich nach der Beziehung

$$K_a = s \cdot l\left[p_1 + 2\sum p_{2\cdots n}\right], \tag{12}$$

l = Einheitssäulenlänge.

Eine überschlägige Berechnung zeigt, daß die äußeren Kühlflächen K_a für radialgeblechte und parallelgeblechte Säulen (460 Dmr.) etwa gleich sind. Allerdings ist bei Radialblechung die Wärmeleitung günstiger, da sich die Kühlfläche nur aus den Schmalseiten der Bleche zusammensetzt. Ein Vergleich der inneren Kühlflächen ergibt folgendes Bild:

Beim parallelgeblechten Kern beträgt die innere Kühlfläche durch Kühlschlitz etwa 50 cm². Bei der radialgeblechten Säule ist nach (10) die Kühlfläche umgekehrt proportional dem Querschnittsausnutzungsfaktor. Sie liegt für das berechnete Beispiel bei etwa 200 cm². Die rechnungsmäßige Kühlfläche bei Parallelblechung beträgt demnach gegenüber der Radialblechung etwa 25 %. Es muß allerdings erwähnt werden, daß der Kühlschlitz bei Parallelblechung wesentlich wirksamer

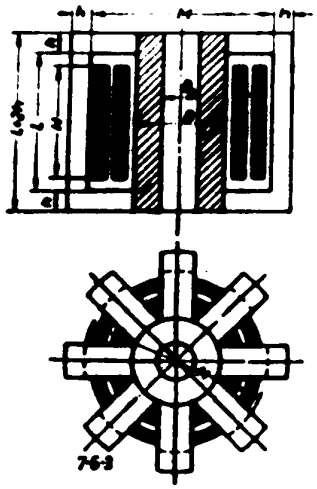


Bild 3. Schematischer Aufbau des radialgeblechten magnetischen Kreises

ist, da die Wärmeleitung in Blechrichtung erfolgen kann. Bei Radialblechung besteht ein Teil der Kühlfläche aus den Breitseiten der Bleche, die Kühlwirkung ist in diesen Fällen wesentlich geringer, da ein höheres Temperaturgefälle, bedingt durch die Isolierschicht zwischen den Blechen, vorhanden ist. Bei Parallelblechung werden allerdings erst Bleche mit einer maximalen Breite von etwa 450 mm mit Kühlschlitzen versehen. Bis zu dieser Breite muß die in Blechrichtung strömende Wärme im wesentlichen von den beiden äußeren Schmalseiten der Bleche abgeführt werden. Bei Radialblechung kann man, unabhängig vom Säulendurchmesser, die Blechbreite in erster Näherung gleich $D/2$ setzen, d. h., daß bei Aufbau nach Bild 3 schon bei wesentlich niedrigeren Blechbreiten eine wirksame Kühlfläche vorhanden ist. Legt man die Verhältnisse der Parallelblechung für die Kühlung zugrunde, so könnte man Säulen bis zu einem Außendurchmesser von etwa 450 mm ohne Kühlkanal bauen. Radialgeblechte Säulen mit Kühlkanal lassen jedoch, wie die vorstehende Betrachtung gezeigt hat, sehr günstige Kühlverhältnisse erhoffen.

Den schematischen Aufbau eines radialgeblechten magnetischen Kreises zeigt Bild 3. Die Säule besteht aus einem Hohlzylinder mit dem Innendurchmesser D_0 und dem Außendurchmesser D. Die Anzahl der Rückschlußjoche kann beliebig

sein. Aus konstruktiven Gründen werden meistens 6 bis 8 gewählt, damit die einzelnen Joche nicht zu breit werden. Die Hauptabmessungen des magnetischen Kreises sind durch die Größen D, L und M gegeben. Der reine Eisenquerschnitt des Schenkels ergibt sich nach:

$$q_{fe} = \frac{D^2 \pi}{4} k. \tag{13}$$

Da sich die Rückschlußjoche am ganzen Säulenumfang anschließen, gilt für β-fache Querschnittsvergrößerung des Joches (β meistens 1,1):

$$\beta \frac{D^2 \pi}{4} k = D \pi h k_{fe}. \tag{14}$$

Hieraus die Jochhöhe:

$$h = 0{,}25 \beta D k_e; \tag{15}$$

für $\beta = 1{,}1$ und $k_e = 0{,}87$ ergibt sich aus (15)

$$h = 0{,}25 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}87 D = 0{,}24 D.$$

Im Vergleich mit den bisher üblichen parallelgeblechten Kernkonstruktionen erhält man bei Radialblechung sehr niedrige Joch- und damit niedrige Bauhöhen. Hierüber soll eine Gegenüberstellung von verschiedenen Kerntypen Aufschluß geben.

Beim klassischen Kerntransformator ist die Jochhöhe annähernd gleich dem Säulendurchmesser $h = D$ (Bild 6 und 7) zu setzen. Beim Vierschenkeltyp und beim einsäulig bewickelten Mantelkern läßt sich infolge Aufteilung des Jochflusses die Jochhöhe auf $h = 0{,}5 D$ erniedrigen. Für einen einphasigen radialgeblechten Transformator erhält man nach (15) $h = 0{,}24 D$. Im Vergleich mit dem Kerntyp hat sich demnach bei Radialblechung die gesamte Jochhöhe von $2 D$ auf $0{,}5 D$, also auf $^1/_4$ erniedrigt. Zwischen Manteltyp und radialgeblechtem Kern ergibt sich ein Verhältnis von $1 D$ zu $0{,}5 D$. Es drängt sich nun die Frage auf, ob diese Verringerung der Jochhöhe die Einführung einer neuen Blechungsart rechtfertigt. Hierzu ein Beispiel:

In 380- bzw. 400-kV-Netzen ist mit Transformatorenleistungen bis zu 300 MVA zu rechnen. Außerdem fordert die größere Isolationsstrecke schwerere Konstruktionen, so daß die Lösung des Transportproblems von kompletten Transformatoren mit den z. Z. höchsten Übertragungsspannungen mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden ist. Man neigt deshalb vorerst dazu, an Stelle von Dreiphasen- drei Einphasentransformatoren zu wählen. Hierbei hätte man zweifellos den Vorteil einer günstigeren Reservehaltung durch einen vierten Einphasentrafo mit $^1/_3$ der Gesamtleistung. Wenn auch das Gewichtsproblem durch diese Aufteilung befriedigend gelöst werden kann, zeigt sich doch, daß die Unterbringung einer Leistung von 100 MVA und darüber bei 400 kV Oberspannung mit den üblichen Kernkonstruktionen Schwierigkeiten bereitet. Infolge starrer Nullpunkterdung kann bei derartigen Transformatoren eine abgestufte Wicklungsisolation Anwendung finden. Um große Isolationsabstände zwischen Wicklung und Joch zu vermeiden, legt man den voll isolierten Phaseneingang in die Säulenmitte und schaltet zwei entgegengesetzt gewickelte Wicklungszweige parallel, so daß an beiden Enden gegen die Joche nur Nullpotential auftritt.

Für einen Einphasentransformator einer 300-MVA-Gruppe ist mit einem Säulendurchmesser von etwa 0,8 m zu rechnen. Beim Kerntyp nehmen von den zur Verfügung stehenden 4,3 m (Bahnprofil) die Joche bereits 1,6 m in Anspruch. Unter

Berücksichtigung der notwendigen Kastenabmessungen bleiben etwa 2 m für die Wicklung übrig. Der Abstand der vollisolierten Hochspannungsphase zum Joch von 1 m liegt unter der bei 400 kV notwendigen Isolationsstrecke. Der Kerntyp kommt deshalb für derartige Transformatoren nicht in Frage. Beim Mantelkern können die Säulen unter gleichen Voraussetzungen um $D = 0{,}8$ m, also auf 2,8 m verlängert werden. Im Interesse der Transportfähigkeit muß die Hochspannungsdurchführung auf der Stirnseite angebracht werden. Hierzu ist es jedoch notwendig, die Oberspannungsableitung zwischen dem Eisen des Rückschlußjoches und der Kastenwand hindurchzuführen. Die Verhältnisse werden günstiger, wenn man einen radialgeblechten Kern entsprechend Bild 4 vorsieht und die Ableitung

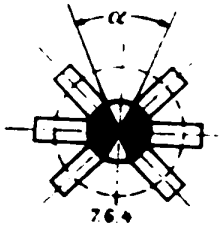


Bild 4. Einsäuliger, radialgeblechter Magnetkreis mit 6 Rückschlußjochen

zwischen den großen Abständen der Rückschlußjoche hindurchführt. Die Jochhöhe ergibt sich dann nach der Beziehung:

$$\beta\, k \frac{D^2 \pi}{4}\left(1 - \frac{\alpha^\circ}{180^\circ}\right) = D\, \pi \left(1 - \frac{\alpha^\circ}{180^\circ}\right) h\, k_{fe}\,, \tag{16}$$

$$h = 0{,}25\, \beta\, D\, k_q\,.$$

Für $\beta = 1{,}1$ und $k_q = 0{,}87$ $\left[\text{bezogen auf eine Fläche } \frac{D^2 \pi}{4}\left(1 - \frac{\alpha^\circ}{180^\circ}\right)\right]$ ergibt sich auch in diesem Fall wieder:

$$h = 0{,}24\, D\,.$$

Auf die gesamte, vom Durchmesser D umschriebene Fläche wird allerdings der Querschnittsausnutzungsfaktor k_q um den Faktor $\left(1 - \frac{\alpha^\circ}{180^\circ}\right)$ kleiner. Bei gleicher Schenkellänge nimmt demzufolge die radiale Wicklungsausladung zu.

Ideal läßt sich das Ableitungsproblem lösen, wenn man einen radialgeblechten Kern, aus 2 Säulen bestehend, verwendet (Bild 5). An Stelle der sternförmig angeordneten Rückschlußjoche treten dann die sogenannten Brillenjoche, die die Säulen brillenförmig umfassen. Die theoretische Jochhöhe ergibt sich nach (15) unter Berücksichtigung der gewählten Konstanten zu

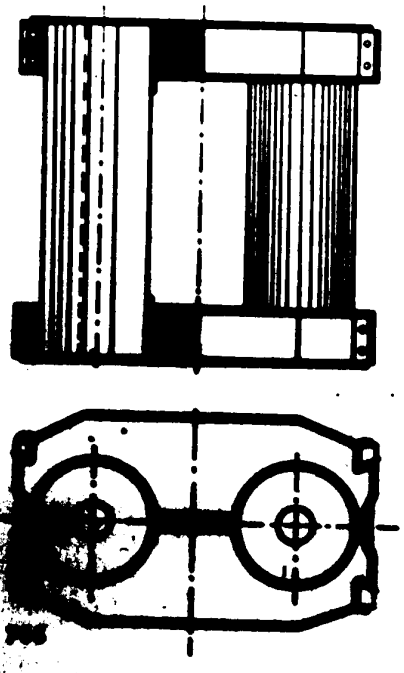
$$h = 0{,}24\, D\,.$$

Daraus ergibt sich eine Jochbreite b (ohne Luftspalt) von

$$\beta \frac{D^2 \pi}{4} k = k_{fe}\, h\, b\,, \tag{17}$$

$$b = 3{,}1\, D\,.$$

Im Interesse einer erträglichen Jochbreite wird man h mit $0{,}30 \cdots 0{,}35\,D$ festlegen. Die Jochbreite ergibt sich dann zu $2{,}5\,D$ bzw. $2{,}2\,D$. Für den 100-MVA-Transformator erhält man damit eine Jochhöhe von $0{,}3 \cdots 0{,}35 \cdot 0{,}8 = 0{,}24$ bis 0,28 m. Damit läßt sich die Jochhöhe im Vergleich zum Manteltyp um etwa



[illegible], radialgeblechter Magnetkreis mit Brillenjochen

[illegible] dem Mantelkern kann dabei die Säule nochmals um [illegible] 2,1 m und gegenüber dem Kerntyp um etwa 1 m ver-

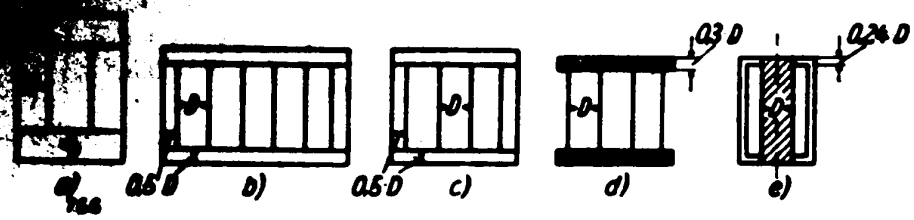


Bild 6. *Vergleich der Jochhöhen verschiedener Kernbauarten von Einphasen-Transformatoren*

a) Kerntyp; b) Vierschenkeltyp; c) Manteltyp; d) zweisäuliger, radialgeblechter Kern; e) einsäuliger, radialgeblechter Kern

In Bild 6 sind die Jochhöhen von Kern-, Vierschenkel-, Manteltyp sowie von radialgeblechtem Kern mit sternförmig angeordneten Rückschluß und Brillenjochen dargestellt. Mit Hilfe der Radialblechung läßt sich eine größere Leistung im Bahnprofil unterbringen.

Nicht nur für Einzel- sondern auch für Dreiphasentransformatoren bringt die radialgeblechte Säule eine erhebliche Verringerung der Bauhöhe mit sich. Beim klassischen Dreischenkelkern (Bild 7) kann wieder die Jochhöhe gleich dem Schenkeldurchmesser D gesetzt werden. Beim Fünfschenkelkern (Bild 7, b) läßt sich im günstigsten Fall die Jochhöhe auf den $\frac{1}{\sqrt{3}}$fachen Wert des Säulendurchmessers erniedrigen.

$h \cong 0{,}58\,D$. Mit Hilfe des radialgeblechten Fünfschenkelkernes (Bild 7, c) ergibt sich durch Aufteilung des Säulenflusses eine Jochhöhe von etwa $0{,}29\,D$. Bild 7 zeigt die Gegenüberstellung der Jochhöhen bei verschiedenen Kernbauarten von Dreiphasentransformatoren.

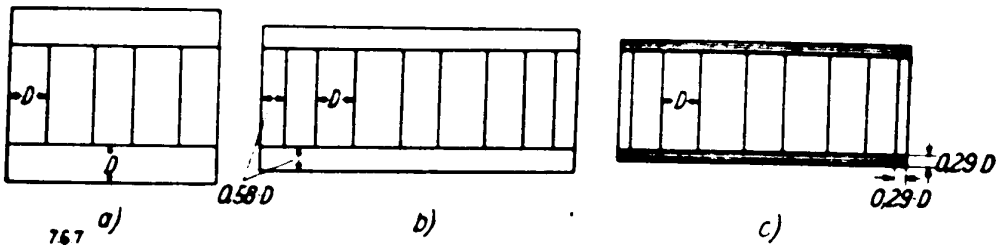


Bild 7. Vergleich der Jochhöhen verschiedener Kernbauarten von Dreiphasen-Transformatoren

a) klassischer Dreischenkelkern; b) parallelgeblechter Fünfschenkelkern; c) radialgeblechter Fünfschenkelkern

Das Säulengewicht bei Radialblechung ergibt sich mit Hilfe obiger Beziehungen und der Bezeichnungen nach Bild 3 zu:

$$G_s = \frac{D^2 \pi}{4} k (L + 2h) \gamma_{fe} = \frac{D^2 \pi}{4} k \left(\frac{L}{D} + 0{,}5 \beta k_q\right) \gamma_{fe}, \tag{18}$$

γ_{fe} = spezifisches Gewicht für Eisen,

und das Gewicht der Rückschlußjoche zu:

$$G_j = \beta \frac{D^2 \pi}{4} k (L + M - D + 2h) \gamma_{fe} = \beta \frac{D^2 \pi}{4} k \left(\frac{L}{D} + \frac{M}{D} - 1 + 0{,}5 \beta k_q\right) \gamma_{fe}. \tag{19}$$

Um einen Vergleich der Eisengewichte zwischen einem radialgeblechten und einem parallelgeblechten Kern durchführen zu können, werden die Beziehungen G_s und G_j ebenfalls für Parallelblechung aufgestellt. Hierzu sei für beide Kerne gleiche Leistung, d. h. gleiche Fensterfläche und gleicher Kernquerschnitt vorausgesetzt.

Für die Höhe der Rückschlußjoche bei parallelgeblechtem Kern gilt:

$$\beta \frac{D^2 \pi}{4} k = 2 D h' k_{fe},$$
$$h' = \frac{\pi}{8} \beta D k_q. \tag{20}$$

Sind die Rückschlußjoche nicht abgestuft, so bedeutet h die tatsächliche Höhe, während es sich bei Abstufungen um einen durchschnittlichen Wert handelt.

Für die Gewichte von Schenkel G'_s und Joch G'_j ergibt sich:

$$G'_s = \frac{D^2 \pi}{4} k (L - 2h) \gamma_e = \frac{D^3 \pi}{4} k \left(\frac{L}{D} - \frac{\pi}{4} \beta k_q\right) \gamma_e \tag{21}$$

und

$$G'_j = \beta \frac{D^2 \pi}{4} k (L + M - D - 2h') \gamma_e = \beta \frac{D^3 \pi}{4} k \left(\frac{L}{D} + \frac{M}{D} - 1 + \frac{\pi}{4} \beta k_q\right) \gamma_e . \tag{22}$$

Das Verhältnis zwischen Säulen- und Jochgewichten (Größen mit Strich für parallelgeblechten Kern) ist dann:

$$\frac{G'_s}{G_s} = \frac{\left(\frac{L}{D} + \frac{\pi}{4} \beta k_q\right)}{\left(\frac{L}{D} + 0{,}5 \beta k_q\right)} > 1 , \qquad \frac{G'_j}{G_j} = \frac{\frac{L}{D} + \frac{M}{D} - 1 + \frac{\pi}{4} \beta k_q}{\frac{L}{D} + \frac{M}{D} - 1 + 0{,}5 \beta k_q} > 1 . \tag{23}$$

Da $\frac{\pi}{4} = 0{,}785 > 0{,}5$, ist $G'_s/G_s > 1$. Dieses Verhältnis wird um so größer, je kleiner L/D ist. Für G'_j/G_j liegen die Verhältnisse ähnlich.

Für $L/D = 2$; $M/D = 2$; $\beta = 1{,}1$; k_q für beide Kerne $= 0{,}85$

$$\frac{G'_s}{G_s} = \frac{2 + 0{,}734}{2 + 0{,}468} = 1{,}105 ,$$

$$\frac{G'_j}{G_j} = \frac{2 + 2 - 1 + 0{,}734}{2 + 2 - 1 + 0{,}468} = 1{,}075 .$$

Das Verhältnis der Gesamtgewichte ergibt sich dann zu:

$$\frac{G'_s + G'_j}{G_s + G_j} = \frac{2{,}734 + 3{,}734}{2{,}468 + 3{,}468} = 1{,}09 .$$

D. h., der radialgeblechte Kern hat, im Vergleich zum parallelgeblechten Mantelkern, bei oben gewählten Abmessungen ein um etwa 9 % geringeres Eisengewicht. Mit der Herabsetzung des Eisengewichtes fallen natürlich auch die Eisenverluste. Bei einem Verhältnis $L/D = 1$ (Bahn-Trafos) und den gleichen Werten für die übrigen Konstanten ergibt sich ein Verhältnis:

$$\frac{G'_s + G'_j}{G_s + G_j} = 1{,}14 ,$$

d. h., daß der radialgeblechte Kern ein um etwa 14 % geringeres Eisengewicht hat.

Was die Bauhöhe anbelangt, ist der radialgeblechte Kern den anderen Konstruktionen offenbar überlegen. Wie sieht es nun mit den Herstellungskosten aus?

Das vorangegangene Beispiel hat gezeigt, daß bei radialgeblechten — gegenüber dem parallelgeblechten Mantelkern — etwa 10 % Eisen eingespart werden. Außerdem trägt beim einsäulig radialgeblechten Kern (Bild 3) die geschlossene zylindrische Form des Eisengestells wesentlich dazu bei, daß der Kessel ohne schwere Versteifungen und der ganze Transformator sehr ölarm ausgeführt werden können. Hierzu einige Zahlenangaben:

Das Gewicht der in Harsprånget (Schweden) aufgestellten parallelgeblechten einphasigen ASEA-Transformatoren für 115 MVA, 16 380 : $\sqrt{3}$ kV beträgt mit Öl 188 t. Das entspricht einem Leistungsgewicht von 1,6 t MVA. Im Gegensatz hierzu gibt BBC-Baden für einen radialgeblechten Transformator mit einem Kernaufbau entsprechend Bild 3 bei einer Typenleistung von 92 MVA, 10 150 : $\sqrt{3}$/380 : $\sqrt{3}$ kV ein Gesamtgewicht von 90 t an. Das entspricht einem Leistungsgewicht von nur 0,98 t MVA, also eine Gewichtsverminderung um rd. 40 %. Entscheidend ist hierbei die Herabsetzung des Ölgewichtes im Kessel, die einmal durch Anwendung einer neuen Hauptisolation (Spreizflanschwickel) und zum anderen durch die günstige runde Form des Eisengestells erreicht wurde. Nach diesen Zahlenangaben ist es nicht verwunderlich, wenn BBC behauptet, daß drei radialgeblechte Einphasentransformatoren bei großen Leistungen nur sehr wenig teurer werden als die entsprechende parallelgeblechte Dreiphaseneinheit.

Auch auf dem Gebiet des Lokomotiv-Transformatorenbaues sprechen eine Reihe von Vorteilen für eine radialgeblechte Säule. Infolge der niedrigen Bauhöhe lassen sich Triebwagentransformatoren bis zu einer Leistung von etwa 900 kVA mit stehender Säule unter dem tiefliegenden Boden, selbst bei modernsten E-Loks, unterbringen. Die Auslegung des magnetischen Kreises erfolgt prinzipiell wie bei Großtransformatoren, nur wird beim Lok-Trafo die Säule sehr kurz gehalten, so daß gedrungene und breite Kernkonstruktionen entstehen. Bei den neuen Lötschberg-Lokomotiven Serie 251 der Schweizerischen Bundesbahn konnte durch Radialblechung das Transformatorengewicht um etwa 40 % reduziert werden. Die Ersparnis ist außerordentlich wertvoll, weil das Gewicht der Ausrüstungsteile für die modernen laufachslosen Lokomotiven auf das äußerste eingeschränkt werden muß. Die Deutsche Bundesbahn hat aus diesem Grunde radialgeblechte Lokomotiv-Transformatoren bei BBC in Auftrag gegeben. Für die neuen Re 4/4-Lokomotiven Nr. 401 bis 450 von 2450 PS Stundenleistung der Schweizerischen Bundesbahnen wurden ebenfalls radialgeblechte Transformatoren für eine Dauerleistung von 1660 kVA bei 15000/105 bis 630 V mit einem Leistungsgewicht von etwa 3,4 t/MVA gebaut; während die bisher unter gleichen Bedingungen laufenden Loks mit 1500-kVA-Trafos der üblichen Bauweise bei einem Leistungsgewicht von etwa 7,3 t/MVA ausgerüstet waren. Diese enorme Gewichtseinsparung, die bei Lok-Trafos in erster Linie auf die günstige Form des magnetischen Kreises zurückgeführt werden kann, zeigt eindeutig die Vorteile dieser neuen Blechungsart, die nach Angaben von BBC bereits bei 200 Loks eindeutig zutage getreten sind.

Ein weiteres Anwendungsgebiet der Radialblechung sind Kupplungstransformatoren für Hochspannungsnetze. Diese Transformatoren werden zur Kleinhaltung der Verluste in Sparschaltung ausgeführt. Das bedeutet kleine Reaktanz und damit geringe Kurzschlußfestigkeit. Eine Erhöhung der Reaktanz wird durch eine breite Wicklung quer zum erzeugten Streufluß erreicht. Jedoch muß dabei dem Streufluß eine allseitige günstige Rückführung zur Verfügung gestellt werden, damit eine zusätzliche Erwärmung der im Wege liegenden Eisenteile fortfällt. Diese Aufgabe wird bei einem radialgeblechten einsäuligen Kern durch die rund um die Säule in möglichst großer Zahl angebrachten Rückschlußjoche erzielt. Mit dem üblichen Kernaufbau bei Radialblechung (Bild 3) kommt man aus, wenn an den Stellen des maximal austretenden Streuflusses zusätzlich sog. „Saugbleche" vorgesehen werden. Bei einer z. B. aus gegenläufigen Scheibenspulen bestehenden

Wicklung genügt es, in der Mitte auf die Rückschlußjoche beiderseitig Saugbleche aufzusetzen. Bei einer mehrlagigen Zylinderwicklung steigt das Streufeld von Lage

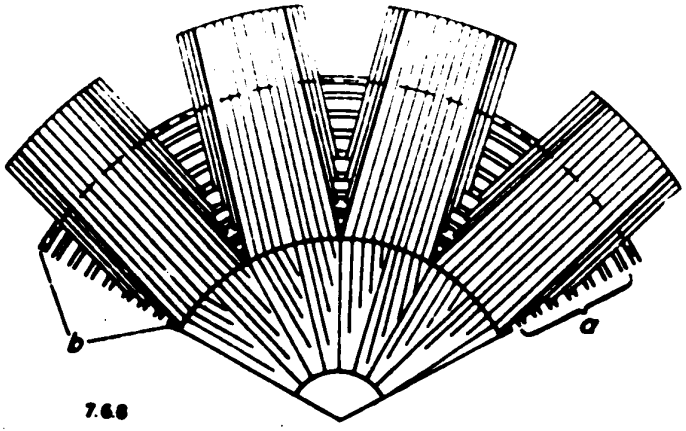


Bild 8. Einsäuliger, radialgeblechter Kern mit Saugblechen
a Hauptwicklung; b Tertiärwicklung

zur Lage, so daß die Zahl der auf die Rückschlußjoche beiderseitig aufzubringenden Saugbleche von der Innenkante bis zur Mitte ansteigt (Bild 8).

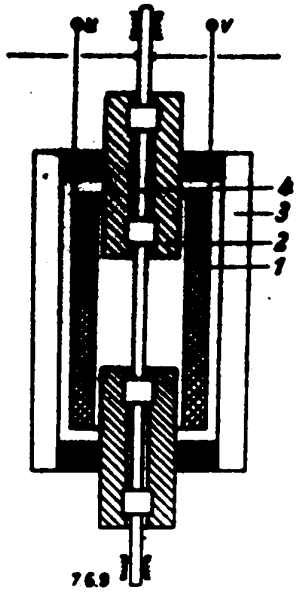


Bild 9. Schematischer Aufbau einer radialgeblechten, stufenlos regelbaren Drosselspule
1 Wicklung; 2 Säulenstummel; 3 Rückschlußjoch; 4 unmagnetische Spindel

Neben den Anwendungsmöglichkeiten im Transformatorenbau bringt die radialgeblechte Säule besonders im Drosselspulenbau eine Reihe von Vorteilen. Der für Erdschlußspulen übliche Aufbau des magnetischen Kreises — Blechkern an mehreren Stellen durch Luftstrecken unterbrochen — wird durch einen Aufbau ent-

sprechend Bild 9 ersetzt. Die Regelung wird hierbei durch einen Luftspalt, dessen Größe durch den Abstand zweier radialgeblechter Säulenstummel gegeben ist, vorgenommen.

Diese neue Bauweise ermöglicht eine wesentliche Erhöhung des Regelbereiches bei stufenloser Regelung sowie eine Induktivitätsänderung im Betrieb. Die in Bild 9 ersichtlichen Säulenstummel 2 werden mit Hilfe einer unmagnetischen Spindel 4 in einem ringförmigen Rückschlußjoch 3 bewegt. Die radiale Blechung der Säule ist notwendig, damit der Fluß bei Überwindung des Luftspaltes auf dem ganzen Umfang die Schmalseiten der Bleche trifft und damit die zusätzlichen Wirbelstromverluste auf ein Minimum reduziert werden. Unter Verwendung der Radialblechung ist die große Drosselspule mit veränderlichem Luftspalt, also ohne Wicklungsanzapfungen möglich geworden.

Für die Berechnung einer derartigen Drosselspule empfiehlt es sich, die Hauptreaktanz X_h, die durch die Abmessungen des Luftspaltes (unter der Annahme, daß sich der Fluß nur über dem Luftspalt schließt) und durch die Kerninduktionen gegeben ist, und die Streureaktanz X_σ, die sich durch den Flußanteil ergibt, der sich außerhalb des Luftspaltes schließt, gesondert zu betrachten. Für den magnetischen Widerstand des Luftspaltes gilt:

$$R_m = \frac{\delta}{\mu_0 q_l}, \tag{24}$$

δ = Luftspaltlänge; $\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-8}$ H/cm; q_l = Querschnitt des Luftspaltes.

Im Luftspalt breitet sich der Magnetfluß aus, deshalb ist $q_l > q_{eisen}$. Bei kleinen Luftspalten genügt es, als seitliche Vergrößerung die Luftspaltlänge anzunehmen. Unter Vernachlässigung des magnetischen Widerstandes des Eisenweges ergibt sich:

$$X_h = \omega \mu_0 q_l \frac{w^2}{\delta}. \tag{25}$$

Die entsprechende theoretische Leistung der Drosselspule ist dann:

$$N_t = \frac{E^2}{X_h}, \tag{26}$$

E = induzierte Spannung.

Da außerdem noch der magnetische Streufluß existiert, der die Streureaktanz X_σ hervorruft, und diese bei großen Luftspalten in der Größenordnung von X_h und darüber sein kann, ergibt sich die tatsächliche Leistung zu:

$$N_p = \frac{E^2}{X_h + X_\sigma} = \frac{E^2}{X_h} \frac{X_h}{X_h + X_\sigma}, \tag{27}$$

wobei $N_t > N_p$. Für die Berechnung der Streuflüsse kann eine allgemein gültige Richtlinie nicht gegeben werden, da es hier wesentlich auf die Anordnung und die Abmessungen des magnetischen Kreises ankommt. Bei großen Luftspalten — wie sie bei radialgeblechten Drosselspulen zu erwarten sind — muß der Fluß mit berücksichtigt werden, der quer durch die Wicklung vom Kern zu den Rückschlußjochen geht und teilweise auf die Wicklung einwirkt. Für eine Anordnung entsprechend Bild 3 und die Annahme, daß die Streulinien als Gerade von der Säule

nach den Rückschlußjochen verlaufen und $L = H$ gesetzt wird, gibt *Kopeček* (siehe Literaturzusammenstellung) für die Streureaktanz folgende Beziehung an:

$$X_\sigma = 4\pi\omega\frac{w^2}{6}\left(\frac{UL}{M-D}\right)10^{-7} \quad [\Omega], \tag{28}$$

U = mittlerer Windungsumfang der Drosselspule.

In Wirklichkeit unterscheidet sich jedoch der Streufluß noch wesentlich von dem der Berechnung zugrunde liegenden Idealfall, so daß man entsprechende Abweichungen in Kauf nehmen muß.

Aus den vorstehend angeführten Gründen kann bei der Berechnung einer regelbaren Drosselspule nicht mathematisch exakt vorgegangen werden, sondern man kann sich nur nach allgemein gültigen Grundsätzen richten und deren Anwendung von Fall zu Fall erwägen. Für den Wert von δ_{max} wird gefordert, daß eine Veränderung des Luftspaltes in der Nähe von δ_{max} noch eine merkliche Änderung der Gesamtreaktanz bewirken muß. Diese Bedingung wird nur dann erfüllt, wenn das Verhältnis X_σ/X_h einen bestimmten Wert nicht übersteigt, der ungefähr bei 1 liegt. Damit hat man zunächst einen Richtwert zur Berechnung der tatsächlichen Leistung. Den Abstand zwischen Wicklung und beweglicher Säule empfiehlt es sich, größer als es die Isolation vorschreibt zu wählen, damit der sich im Luftspalt ausbeulende Fluß so wenig wie möglich in die Wicklung dringt.

Zusammenfassung

Für radialgeblechte Magnetkreise werden Berechnungsformeln und konstruktive Hinweise gegeben und in einer Gegenüberstellung der verschiedenen Kerntypen die Vorteile der Radialblechung bei Groß-Transformatoren, Lok-Trafos und regelbaren Drosselspulen herausgearbeitet.

Literatur

[1] *Meyerhans, A.:* BBC-Mitteilungen 1941 S. 307.
[2] *Meyerhans, A.:* Bulletin des SEV 1944 S. 636.
[3] *Dittrich, G.:* KdT-Sonderdruck, Weimartagung 1952.
[4] *Kopeček, J.:* Elektrotechnický Obzor 1953 S. 624.
[5] *Stamm, H.:* Wissenschaftl. Zeitschrift der Techn. Hochschule Dresden 1952/53 S. 1061.
[6] *Buchner, M.:* Bulletin des SEV 1953 S. 145.
[7] *Sachs, K.:* Elektrotechnik und Maschinenbau 1949 S. 220.
[8] *Konrad, H.:* BBC-Nachrichten 1950 S. 65.
[9] *Müller, A. E.,* u. *G. Borgeaud:* Elektrische Bahnen 1953 S. 167.
[10] *Hugentobler, E.:* BBC-Mitteilungen 1954 S. 234.
[11] *Nimmerichter, W.:* AEG-Mitteilungen 1952 S. 76.
[12] *Dittrich, G.:* Wissenschaftl. Zeitschrift der Techn. Hochschule Dresden 1952/53 S. 1043.
[13] *Meyerhans, A.:* BBC-Mitteilungen 1943 S. 291.
[14] *Meyer, E.:* Elektrische Bahnen 1953 S. 209.
[15] *Wenger, M.:* Elektrotechnik und Maschinenbau 1950 S. 1.

7.7 Elektrische und mechanische Probleme beim Bau von Hydrogeneratoren

Dipl.-Ing. *Mönnig*, Dresden

1. Einleitung

Trotzdem fast in allen Ländern Europas, Asiens und Amerikas die Ausnutzung der Atomkraft zur Erzeugung elektrischer Energie weit fortgeschritten ist, hat noch in keinem Jahrzehnt der Ausbau hydroelektrischer Zentralen eine so große Rolle gespielt wie in den beiden letzten. Wir kennen den Ausbau der Wasserkräfte in der SU aus den Berichten über die Großbauten des Kommunismus; die SU plant die Verdreifachung der Gesamtleistung der Wasserkraftwerke in den Jahren 1951 bis 1955. In Europa sind die skandinavischen Länder Schweden und Norwegen in der Ausnützung ihrer Wasserkräfte führend. Frankreich deckt 80 %, Italien 40 % seines Bedarfes an elektrischer Energie aus Wasserkräften. Pakistan plant den Ausbau seiner Wasserkräfte, um der Industrialisierung des Landes das notwendige Fundament zu verschaffen. Die ungeheueren Leistungen in den Flüssen der Volksrepublik China und Indiens werden die Grundlage für den Aufbau der Wirtschaft in diesen Ländern bilden.

Die Deutsche Demokratische Republik besitzt leider nur wenig Wasserkräfte größerer Leistung. Nur die Elbe kommt als wesentlichster Kraftstrom in Frage. Über deren Ausbau sind in Vergangenheit und Gegenwart viele Vorschläge gemacht worden. Hält man die Staubreiten und Überschwemmungsgebiete in mäßigen Grenzen, so lassen sich nur geringe Fallhöhen von etwa 4 m erreichen, so daß Turbinen und Generatoren kleiner Drehzahl und großen Gewichtes gewählt werden müssen. Die für eine derartige Staustufe notwendigen Investmittel sind sehr hoch, so daß es vorläufig zweckmäßiger ist, die Energieerzeugung auf kalorische Kraftwerke aufzubauen. Mit Rücksicht darauf aber, daß die Kohle ein wichtiger Rohstoff für die chemische Industrie ist und daß die Vorräte nicht unbegrenzt sind, müssen auch kleinere Wasserkräfte ausgenutzt werden, besonders dann, wenn die Wasserbauten schiffahrtstechnisch, wasserbaulich oder zur Landkultivierung notwendig sind. Damit ist schon das erste Problem gegeben, nämlich das Problem des wirtschaftlichsten Aufbaues kleiner Hydrozentralen.

2. Probleme beim Bau kleiner und mittlerer Hydrogeneratoren für kleine Fallhöhen

Bei Gefällen von 3 m bis 10 m und Leistungen von 500 bis 2500 kVA kommt nur die vertikale doppelt geregelte Kaplanturbine mit Drehzahlen zwischen 100 und 187 U/min in Frage. Hohe Durchgangsdrehzahlen von 2,5- bis 3,2facher Nenndrehzahl, hohle Wellen zur Aufnahme des Servomechanismus für die Verstellung der Laufschaufeln kennzeichnen diese Ausführung. Generator, Turbine und Krafthaus müssen eine Einheit bilden. Es ist daher unbedingt notwendig,

daß der Konstrukteur der elektrischen Maschine mit dem Konstrukteur der Turbine eng zusammenarbeitet, um die wirtschaftlichste Gesamtbauart zu finden. Es ist sehr naheliegend, zur Verringerung des Gewichtes raschlaufende Generatoren von etwa 500 bis 750 U/min über Getriebe zu verwenden. Bis 500 kVA ist daher der horizontale Generator mit Antrieb über Kegelradgetriebe die wirtschaftlichste Bauart. Stößt der Bau von Kegelradgetrieben bei größeren Leistungen auf Schwierigkeiten, so müssen Stirnradgetriebe und Vertikalgeneratoren verwendet werden. Damit entsteht eine wesentlich kompliziertere Bauart. Bild 1 zeigt eine derartige

Bild 1. Vertikalgenerator des Sachsenwerkes 600 kVA, 500 U/min mit Antrieb über Getriebe (Baujahr 1930)

Ausführung, wie sie bereits vor 30 Jahren gebaut wurde. Die vertikale Welle [illegible] treibt über ein Stirnradgetriebe den Vertikalgenerator, der auf [illegible] Laterne aufgebaut ist und eine angeflanschte Erregermaschine [illegible]. Der Generator hat sein eigenes Traglager, während das Getriebe das Laufzeuggewicht und den axialen Wasserschub aufnimmt. Wie Bild 1 zeigt, ergibt sich eine [illegible] Kraftshaushöhe und eine schwierige Montage des unteren Turbinendeckels. Mitbestimmend für den gesamten konstruktiven Aufbau ist der Antrieb der Erregermaschine und des Turbinenreglers. Es ist im wesentlichen eine Frage der Getriebekosten, ab welcher Leistung der direkt angetriebene Generator wirtschaftlicher ist. Bei kleinen Leistungen genügt ein Führungslager am Generator; das Traglager kann im oberen oder unteren Tragstern untergebracht werden und wird in der Regel mit dem Führungslager kombiniert. Es entstehen damit die Bauarten nach Bild 2 und 3. Die Ausbildung nach Bild 3 mit Traglager am Turbinendeckel (Schirmgenerator) ergibt den geringsten Baustoffaufwand, da der obere Tragstern lediglich den Ölzuführungsbock des Servomotors für den Regler und

die Erregermaschine trägt, also leicht ausgeführt werden kann. Außerdem ergibt diese Anordnung die geringste Maschinenhaushöhe, so daß sie bei neuen Anlagen fast ausnahmslos angewendet wird. Bei kleinen Leistungen läßt sich die geringste erzielbare Bauhöhe nicht ausnutzen, weil aus Bedienungsgründen die Raumhöhe über dem Turbinendeckel etwa 1,8 m betragen muß. Trotzdem ermöglicht der Vertikalgenerator gegenüber der Getriebeausführung eine Verkleinerung des Maschinenhauses in Breite und Höhe.

Ruhiger Lauf, guter Wirkungsgrad, einfache Montage und hohe Betriebssicherheit sind Vorteile des Vertikalgenerators, größerer Materialverbrauch und schwie-

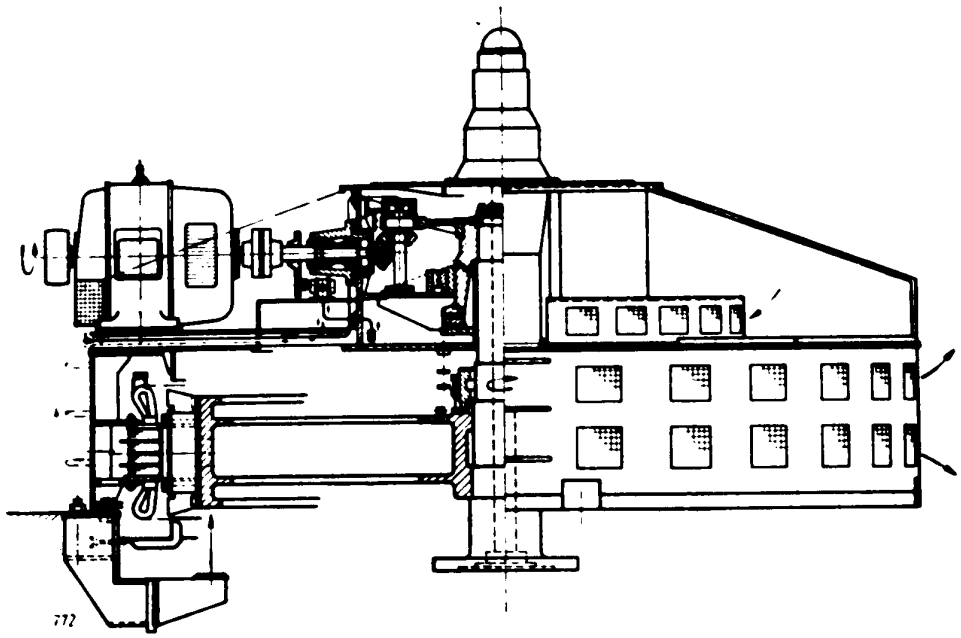


Bild 2. Vertikalgenerator **1000 kVA, 125 U/min, 6 kV** ***mit Traglager im oberen Armstern***

rigerer Transport seine Nachteile. Dabei kann die Erregerwicklung infolge des großen Durchmessers ohne Schwierigkeiten in Aluminium ausgeführt werden. Bild 4 zeigt eine Gegenüberstellung des Materialaufwandes und der Kosten bei einem Generator 1000 kVA, 125 U/min, $\cos\varphi = 0{,}8$.

Bei einem Getriebepreis von 3,0 DM/kg ergibt sich bereits bei 500 kVA ein Vorteil für den Vertikalgenerator. Die Kosten des Generators werden nicht unwesentlich vom geforderten Schwungmoment (GD^2) beeinflußt, da jede Erhöhung eine Gewichtserhöhung des Polrades und der Traglagerkonstruktion einschließlich Tragstern nach sich zieht. Man sollte daher bei mittleren Leistungen Drehzahlerhöhungen bis 40 % bei Regelvorgängen vorübergehend zulassen, zumal normalerweise nicht Inselbetrieb, sondern Parallelbetrieb mit einem Industrienetz in Frage kommt. Pendel- und Erregermaschinenantrieb stellen dem Konstrukteur besonders bei kleinen Leistungen unangenehme Aufgaben. Langsamlaufende Erregermaschinen sind schwer, schnellaufende Erregermaschinen mit vertikaler Achse müssen durch Keilriemen oder über Getriebe angetrieben werden. In beiden Fällen

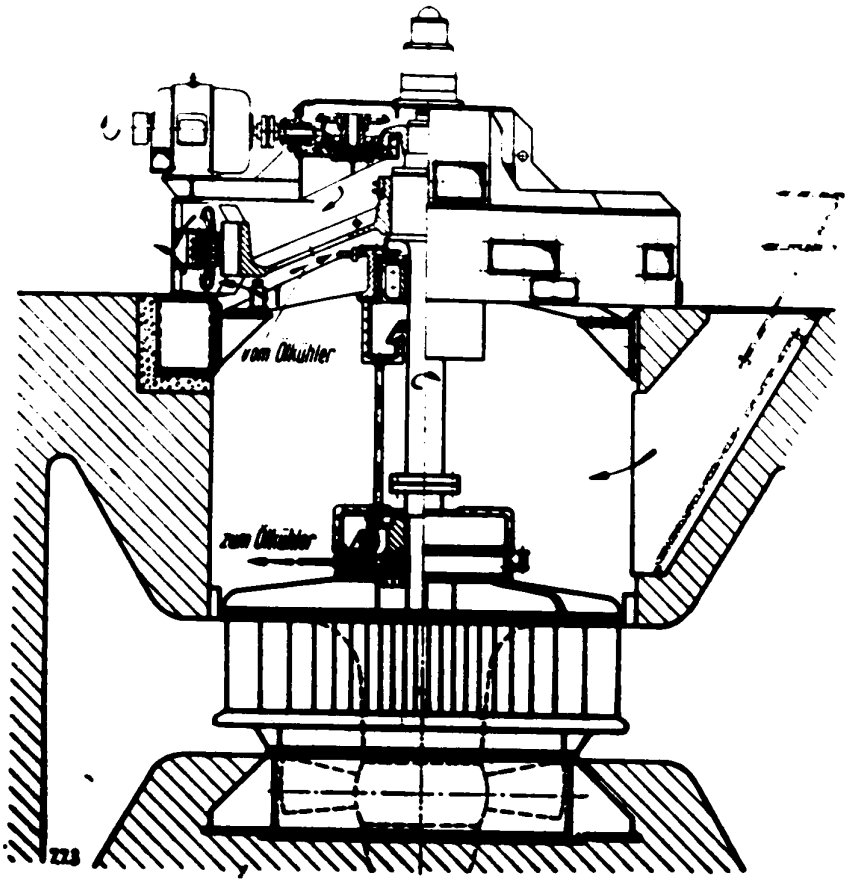


Bild 3. *Vertikalgenerator* **1000 kVA, 125 U/min, 6 kV** *mit Traglager am Turbinendeckel*

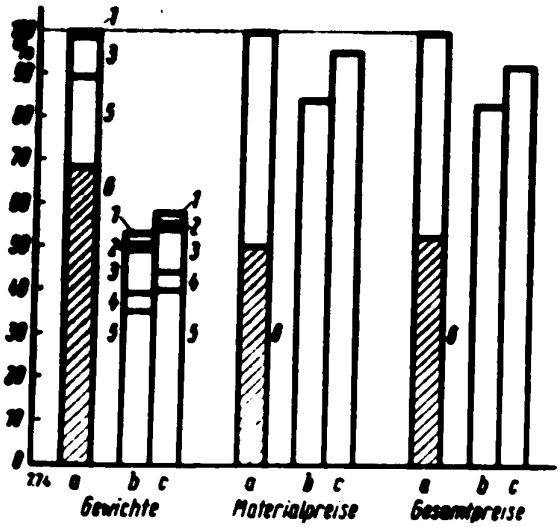


Bild 4. *Gewichts- und Preisvergleich zwischen einem Generator* **1000 kVA** *mit und ohne Getriebe*

a Getriebegenerator **1000 kVA**, $\cos\varphi = 0{,}8$; *b* direkt gekuppelter Schirmgenerator **1000 kVA**, $\cos\varphi = 0{,}7$; *c* direkt gekuppelter Generator mit Traglager oben; *1* Cu; *2* Alu; *3* Dyn.-Blech; *4* St II 23; *5* inaktives Material; *6* Getriebe

ist der Aufwand im Vergleich zum Hauptgenerator erheblich. Soweit eine zuverlässige Hilfsspannung genügender Leistung vorhanden ist, ist daher der getrennte raschlaufende Erregersatz vorzuziehen.

Bei kleinen Leistungen bis 2000 kVA wird das Fliehkraftpendel im allgemeinen in der bekannten Weise mittels Riemen angetrieben. Diese Antriebsart ist im Betrieb zwar nicht sehr beliebt und legt die räumliche Art des Reglers im Maschinenhaus und damit oftmals dieses selbst fest, ist aber am billigsten.

Bei der Anordnung nach Bild 2 und 3 wird die Erregermaschine über Kegelradgetriebe angetrieben und trägt am zweiten Wellenende die Riemenscheibe für den Reglerantrieb. Gute Zugänglichkeit, leichte Austauschbarkeit und Überwachung sowie Verwendungsmöglichkeit normaler Erregermaschinen sind Vorteile dieser Anordnung. Wie aus Bild 2 und 3 ersichtlich, ist aber der Aufwand für das Getriebe ganz erheblich, zumal zweckmäßig erst ein Stirnrad zum Ausgleich des axialen Wellenspiels und dann erst ein Kegelrad angeordnet wird. Es erscheint daher durchaus zweckmäßig die Entwicklung von Pendeln mit geringstem Leistungsbedarf (etwa 300 W) zu betreiben und den Pendelmotor von einem Pendelgenerator (etwa 1,5 kVA) mit Permanentmagnetpolen zu speisen, der direkt oder wieder über Getriebe von der Turbinenwelle angetrieben wird. Führt man das Drucköl zum Servomotor über Bohrungen der Welle oberhalb des Turbinendeckels zu, so bleiben über der Polradnabe nur die Erreger-Schleifringe. Es ergibt sich eine sehr niedrige Bauweise, die besonders für Freiluftausführung ohne Maschinenhaus geeignet ist.

3. Probleme beim Bau großer Wasserkraftgeneratoren

3.1 Mechanische Probleme

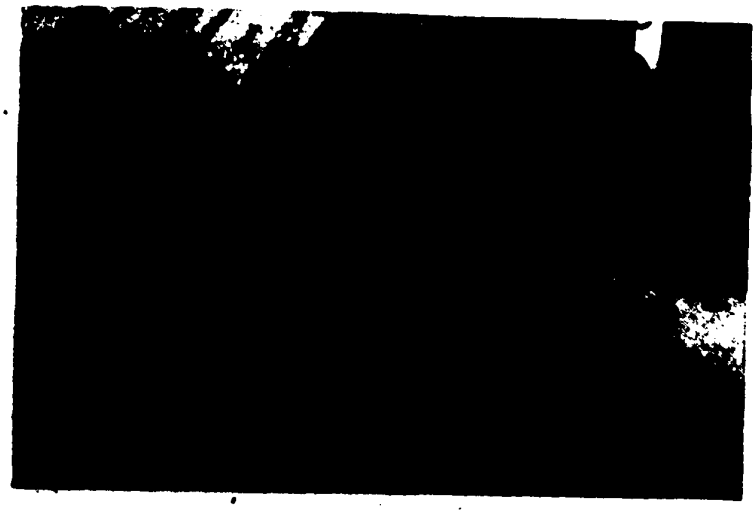
Während bei Generatoren kleiner und mittlerer Leistung technologische Probleme — einfache Anordnung und wirtschaftliche Fertigung — im Vordergrund stehen, treten bei großen Leistungen erhebliche technische Probleme elektrischer und mechanischer Art auf.

Die Größe und das Gewicht einer elektrischen Maschine ist bekanntlich nicht der Leistung, sondern dem Drehmoment proportional. Infolge der hohen Leistung bei kleiner Drehzahl gehören daher Wasserkraftgeneratoren zu den größten elektrischen Maschinen.

3.11 Blechkettenläufer, Scheibenläufer

Der große Läuferdurchmesser, das hohe Drehmoment im Betrieb und Kurzschluß zusammen mit der hohen Umfangsgeschwindigkeit bei Durchgangsdrehzahl erfordern Sonderkonstruktionen des Polrades, wobei Transportfragen eine ausschlaggebende Rolle spielen. Für vielpolige Maschinen hat sich der Blechkettenläufer fast ausnahmslos durchgesetzt. Der Radkranz ist dabei aus gestanzten und überlappt geschichteten Stahlblechsegmenten aufgebaut, die durch axial eingezogene Bolzen ähnlich den Gliedern einer Kette miteinander verbunden sind. So entsteht ein selbsttragender Ring, der lediglich die Umfangskräfte auf die Arme der Nabe überträgt. Die Arme sind meistens mit der Nabe verschraubt, so daß ein leichter Transport der einzelnen Teile, deren Gewicht unter 12 t liegt, erfolgen kann. Da die Blechkette der Berechnung gut zugänglich ist, die Bleche selbst infolge der Herstellung durch Walzen eine gute Gleichmäßigkeit der Qualität besitzen und auch einwandfrei geprüft werden können, kann beim Blechketten-

läufer auf das Schleudern verzichtet werden. Die einzelnen Bleche werden am Montageort geschichtet, die Bohrungen aufgedornt, die Bolzen eingezogen und die



[illegible]. Polradscheibe *für einen Wasserkraftgenerator* 31,5 MVA, 375 U/min

[illegible] der Blechkette mittels eingestanzter Schwalbenschwanz- [illegible] befestigt. Bei kleineren Durchmessern genügt es, nur

[illegible]. Polkörper komplett *für einen Wasserkraftgenerator* 31,5 MVA, 375 U/min

einige Arme des Nabensternes abschraubbar auszuführen oder in radialer Richtung zu teilen, um das Eisenbahnprofil einzuhalten.

Bei Läuferdurchmessern von 2,5 bis 4,8 m, die bei größeren Leistungen hauptsächlich bei Drehzahlen von 200 bis 500 U/min vorkommen, hat sich die Scheiben-

konstruktion eingebürgert. Der Radkranz ist dabei aus Stahlscheiben aufgebaut, die auf einen kurzen Armstern oder auf die Welle selbst aufgeschrumpft werden und deren Dicke mit Rücksicht auf die Eindringtiefe der Vergütung 250 bis 300 mm nicht übersteigen soll. Zwischen den Scheiben bleiben Luftkanäle zur Belüftung der Polspulen namentlich in der Mitte des Eisenblechpaketes. Bild 5 zeigt eine derartige Scheibe, Bild 6 einen kompletten Polkörper einer 16poligen Maschine. Die Nuten zur Befestigung der Pole werden in den einzelnen Scheiben vorgearbeitet während die Endbearbeitung am kompletten Polkörper nach dem Aufziehen der Scheiben erfolgt. Es empfiehlt sich das Aufziehen der Scheiben auf den Armstern mit eingezogener Welle vorzunehmen.

3.12 Polbefestigung

Die hohen Fliehkräfte bei Durchgangsdrehzahl erfordern besondere Polbefestigungskonstruktionen, von denen die Schwalbenschwanz-, Hammerkopf- und die Kammkonstruktion die bekanntesten sind. Die Kammkonstruktion eignet sich besonders für Maschinen geringer Polzahl, während sich das Anwendungsgebiet der Schwalbenschwanz- und Hammerkopfnutenbefestigung überschneidet. Die Schwalbenschwanznut ist einfacher und benötigt radial weniger Platz als ein mehrteiliger Hammerkopf (1- bis 3teilig), eignet sich daher besonders für kleinere Polbreiten bei geringerer radialer Höhe des Radkranzes. Technologisch ist die große Öffnung des Schwalbenschwanzes vorteilhaft, die Erzielung der genauen Schräge jedoch schwierig, so daß ein Einpassen der Pole notwendig ist. Hingegen hat der Hammerkopf nur Flächen mit Winkel von 90° und kommt mit groben Toleranzen aus. Insgesamt ist die Zerspanungsarbeit jedoch größer als bei der Schwalbenschwanznut. Die Verkeilung des Hammerkopfes soll eine Vorspannung erzielen, die etwa 10 bis 30 % über der durch die Fliehkraft hervorgerufenen Spannung liegt. Es empfiehlt sich mittels Dehnungsmeßstreifen oder magnetischer Spannungsmeßeinrichtungen diese Vorspannung zu kontrollieren. Sowohl die Schwalbenschwanznut als auch die Hammerkopfnut ist wegen der raschen Querschnittsübergänge (trotz Abrundung) einer genauen Berechnung der örtlichen Spannungen nur schwer zugänglich. Spannungsoptische Untersuchungen haben ergeben, daß die maximalen Spannungsspitzen 40 bis 70 % über den nach den üblichen Methoden berechneten mittleren Werten liegen. Der verwendete Stahl muß daher genügende Dehnung besitzen, so daß sich lokale Spannungsspitzen durch plastische Verformung ausgleichen können. Aus dem gleichen Grunde sollen genügend große Abrundungsradien verwendet werden.

3.13 Traglager

Wasserkraftgeneratoren werden je nach Zweckmäßigkeit für den hydraulischen und baulichen Teil mit horizontaler oder vertikaler Welle gebaut. Bei vertikaler Welle muß das Gewicht des Generatorläufers mit Welle, des Turbinenlaufrades und der axiale Wasserschub durch das Traglager aufgenommen werden. Meist ist dieses mit einem Führungslager vereinigt und entweder im oberen oder unteren Armstern oder auf dem Turbinendeckel angeordnet. Das Traglager ist in der bekannten Weise als Segmentspurlager ausgebildet, um die großen Axialdrücke bis 2000 t aufzunehmen. Die Flachlandflüsse der SU z. B. ergeben für die einzelnen Staustufen nur geringe Fallhöhen von 6 bis 20 m bei sehr großen Wassermengen, woraus sich nur kleine Drehzahlen von 40 bis 60 U/min bei Leistungen von 50

bis 120 MW ergeben. Die Gewichte dieser Generatoren sind die größten der Welt, die Traglager haben bis 2100 t zu tragen. Es war daher die Entwicklung besonderer unterteilter Lager in der SU notwendig, da die einfache geometrische Vergrößerung der Lager die Kontinuität des Ölfilms nicht mehr gewährleistet. Unvermeidliche mechanische und thermische Formänderungen sowie Bearbeitungsfehler erreichen die Größe der Schmierfilmdicke, so daß ein einwandfreier Ölfilm nicht mehr zustande kommt, wenn bei der üblichen Konstruktion die Lagerfläche bei gegebener Flächenpressung einfach entsprechend vergrößert wird.

3.2 Elektrische Probleme

3.21 Blechpaket, Ständerwicklung

Das Blechpaket ist wie üblich aus überlappt geschichteten Blechsegmenten aufgebaut. Wegen der Erschütterungen ist infolge der Gewichtsbelastung bei vertikaler Welle ein stärkeres Setzen des Blechpaketes zu befürchten. Dem Setzen und Pressen der Blechkette ist daher besondere Sorgfalt zu widmen. Die Ständerwicklung der Hydrogeneratoren unterscheidet sich nicht von der normaler Generatoren großer Leistung. Soweit möglich wird eine Zweistabbruchlochwicklung verwendet, da diese Wicklung große mechanische Festigkeit, hohe Windungsisolation (Stoßsicherheit) und gute elektrische Eigenschaften besitzt. Die Stäbe oder Spulen werden in offene Nuten eingelegt. Die beiden bekannten klassischen Isolationsverfahren werden nebeneinander angewandt, d. h. entweder die Stäbe im Nutenteil umglimmert und die Wickelköpfe mit Mikaband isoliert, oder der Halbstab durchgehend mit schwarzem Mikaband (Asphaltbasis) im Nuten- und Kopfteil isoliert und compoundiert. Die durchgehende Isolation gibt kürzere Wickelköpfe, höhere Isolationssicherheit durch Vermeidung der Stoßstelle zwischen Nut- und Wickelkopfisolation und die Möglichkeit eines einfachen Glimmschutzes, ist aber teurer.

3.22 Verringerung der Reaktanzen von Wasserkraftgeneratoren bei langen Leitungen

Meistens liegen die wirtschaftlich ausnutzbaren Wasserkraftvorkommen meist nicht in den Verbrauchsschwerpunkten. Die Entfernung zwischen Harspranget, dem größten Wasserkraftwerk in Nordschweden und Südschweden beträgt etwa 800 km, die Entfernung zwischen Kuibyschew und Moskau ebenfalls etwa 800 km. Große Wasserkraftgeneratoren arbeiten also häufig über Umspanner auf lange Höchstspannungsleitungen, deren Errichtungskosten und Verluste den Preis der elektrischen Energie am Leitungsende wesentlich beeinflussen. Bekanntlich ist die stabil übertragbare Grenzleistung einer Leitung mit der Spannung U_1 am Anfang und der Spannung U_2 am Ende gleich

$$N_{WGr} = \frac{U_1 \cdot U_1}{\sqrt{\frac{x_0}{b_0}} \cdot \sin \sqrt{x_0 b_0}\, l},$$

wenn x_0 der spezifische Blindwiderstand je km, b_0 der spezifische Leitwert je km und l die Länge der Leitung ist. Sie ist also der Reaktanz umgekehrt proportional. Um eine hohe Ausnützung der Leitung zu erreichen, wird daher das x_0 durch Übergang auf Höchstspannung, durch Bündelleiter und Längskompensation mittels Kondensatoren möglichst verkleinert. Werden der Generator und die Trans-

formatoren in das Schema einbezogen, so ergibt sich ein Ersatzschaltbild (Bild 7), das aus 3 Vierpolen besteht, die zu einem vereinigt werden können. Die Auswertung führt auf den Wert

$$N'_{WGr} = \frac{E_d\, U_e}{\left[\sqrt{\frac{x_0}{b_0}}\sin\alpha l + (X_d + X_{T_1} + X_{T_2})\cos\alpha l - (X_d + X_{T_1})\, X_{T_2}\sqrt{\frac{b_0}{x_0}}\cdot\sin\alpha l\right]}$$

für die erreichbare theoretische Grenzleistung. Für

$$X_d = X_{T_1} = X_{T_2} = 0 \text{ wird } E = U_1,\ U_e = U_2 \text{ und } N'_{WGr} = N_{WGr}$$

(kurzgezogene Kurven in Bild 7). Werden die Generator- und Transformatorreaktanzen berücksichtigt, so gelten die gestrichelten Kurven, die bei Leitungs-

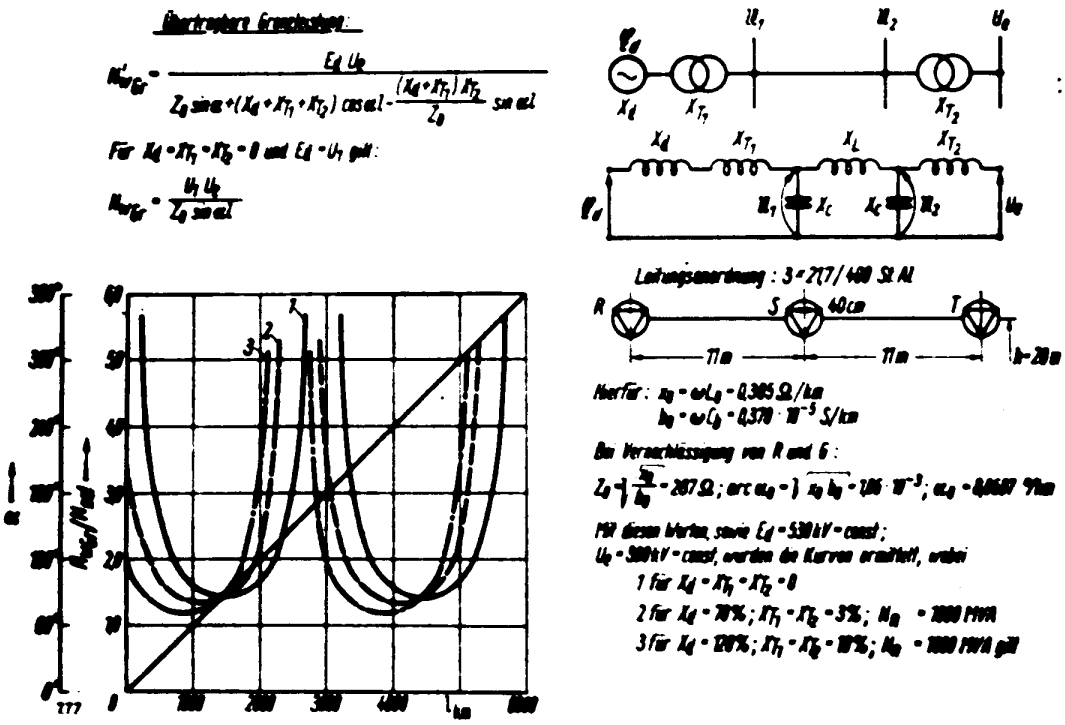


Bild 7. Theoretische übertragbare Grenzleistung einer Hochspannungsleitung

längen bis etwa 800 km ganz erheblich unter den Kurven für die reine Leitung liegen können. Es müssen daher die Reaktanzen der Transformatoren z. B. durch Verwendung von Spartransformatoren und die Reaktanz X_d des Generators niedrig gehalten werden. X_d setzt sich für den stationären Zustand aus der Hauptfeldreaktanz X_h (etwa 80 bis 90 %) und der Ständerstreureaktanz $X_{1\sigma}$ (10 bis 20 %) zusammen.

Während normale Generatoren eine Synchronreaktanz von etwa 80 bis 140 % und eine transiente Reaktanz von 30 bis 35 % haben, werden große Wasserkraftgeneratoren meist mit einer Synchronreaktanz von 60 bis 80 % und einer tran-

sienten Reaktanz von 20 bis 25 % ausgeführt. Die Verkleinerung der Synchronreaktanz oder die Erhöhung des Leerlaufkurzschlußverhältnisses (reziproker Wert) erfordern eine Herabsetzung der Ausnutzung, d. h. eine Vergrößerung der Abmessungen und des Gewichtes bei gegebener Leistung. Es ist dabei zweckmäßig, den Bohrungsdurchmesser zu vergrößern, weil damit das Schwungmoment je kVA steigt, was wiederum eine Stabilitätserhöhung mit sich bringt. Es ist jedoch bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen immer zu bedenken, daß die Verringerung der Reaktanz im Generator mit erhöhten mechanischen Schwierigkeiten erkauft wird.

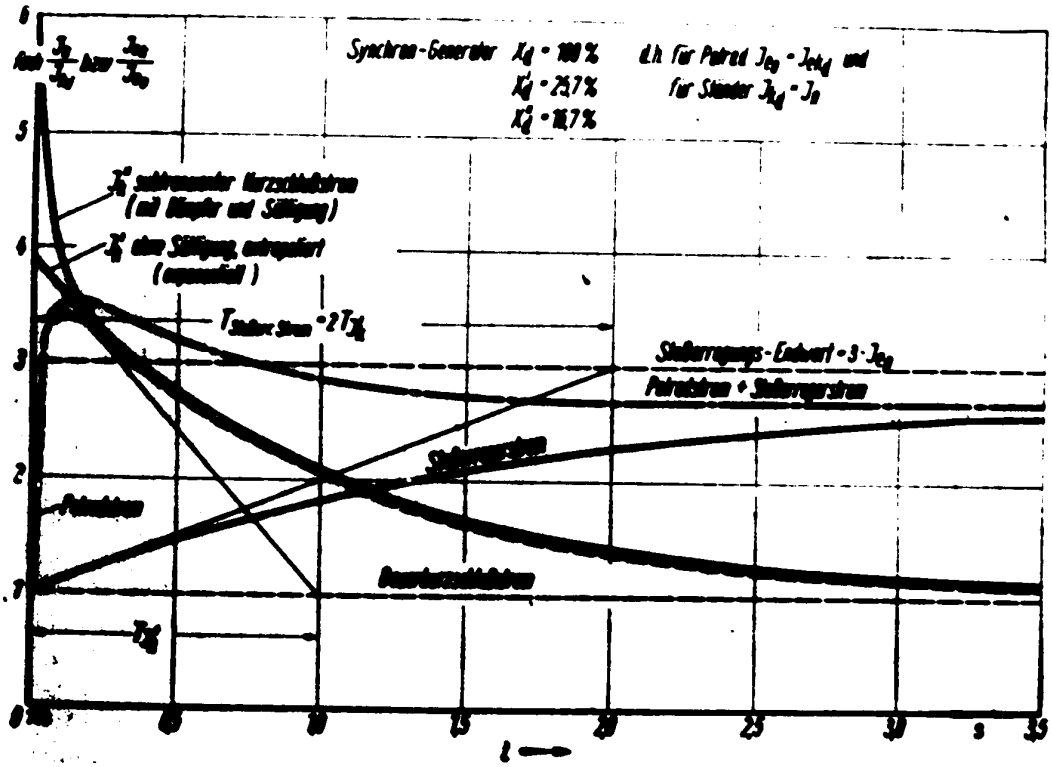


Bild 8. Verlauf der Ständer- und Polradströme bei Eintritt eines Kurzschlusses

Man kann annehmen, daß eine Reduktion der Reaktanz X_d auf den Wert $k \cdot X_d (k < 1)$ die Kosten des Generators K auf $\frac{K}{\sqrt{k}}$ steigert, d. h. bei Verringerung auf die Hälfte steigen die Kosten um 40 %.

Bild 7 zeigt auch den großen Wert einer reichlichen und schnellen Erregung, die in Anpassung an die Generatordaten und die Netzdaten entwickelt werden muß. Wird an Stelle der Spannung E entsprechend konstanter Erregung die Spannung U_1 konstant gehalten, so wird gemäß voll ausgezogener Kurve die übertragbare Leistung wesentlich erhöht. Kleine Reaktanzen kommen dem Aufbau einer derartigen Regelung entgegen, so daß man praktisch beide Methoden anwenden wird.

Arbeiten die Generatoren nicht auf eine lange Leitung, sondern auf ein Verbundnetz, so gelten ähnliche Gesichtspunkte für die Reaktanzen und die Regelung. Um einen Zerfall des Verbundbetriebes bei einer Störung, z. B. einem Kurzschluß,

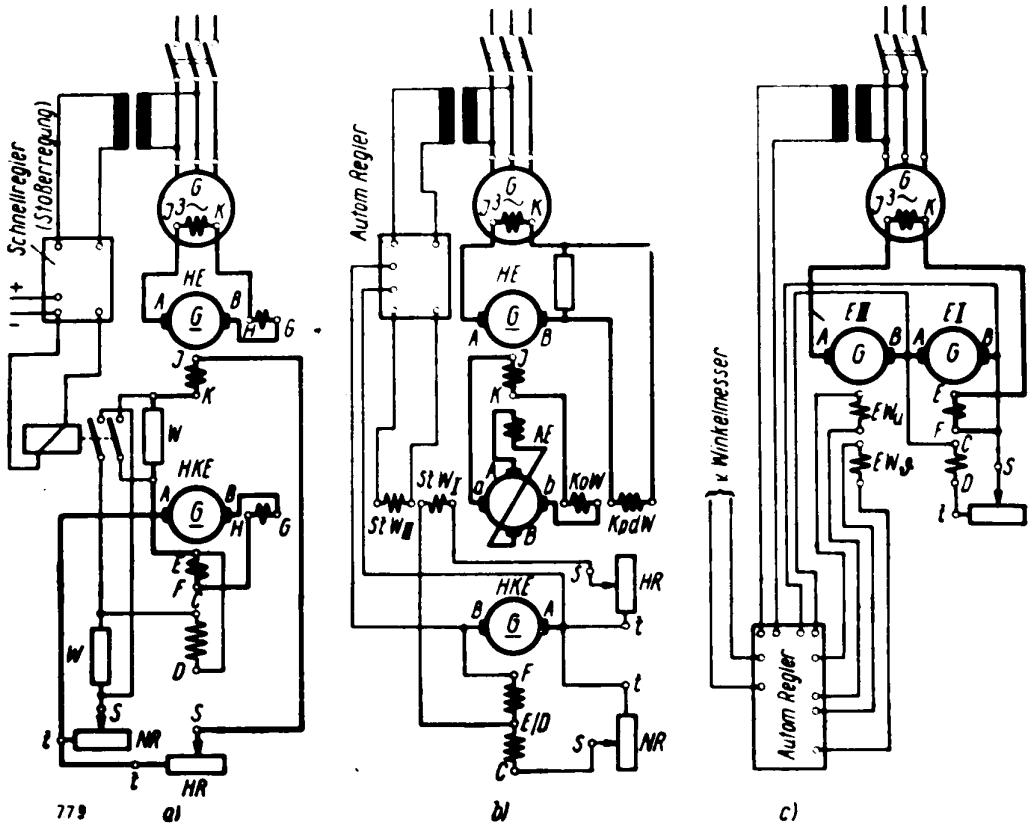


Bild 9a. Erregerschaltung mit Haupt- und Hilfserregermaschine

HE **Haupterregermaschine;** ***HKE*** **Hilfserregermaschine;** ***HR*** **Hauptschlußregler;** ***NR*** **Nebenschlußregler;** ***W*** **Widerstände des Schnellreglers**

Bild 9b. Erregerschaltung mit Verstärkermaschine und Kompoundwicklung

HE **Haupterregermaschine;** ***AE*** **Amplidyne-Erregermaschine;** ***StW_I*** **Steuerwicklung der Grunderregung;** ***StW_II*** **Steuerwicklung der autom. Regelung;** ***HKE*** **Gleichstrom-Kompound-Erregermaschine;** ***HR*** **Hauptschlußregler;** ***NR*** **Nebenschlußregler;** ***KoW*** **Kompensationswicklung;** ***KpdW*** **Kompoundwicklung**

Bild 9c. Erregerschaltung mit Zu- und Gegenschaltung

EI **Konstantspannungs-Erregermaschine;** ***EII*** **Erregermaschine in Gegenschaltung;** ***EW_u*** **Spannungsgesteuerte Erregerwicklung;** ***EW_ϑ*** **Lastwinkelgesteuerte Erregerwicklung**

zu vermeiden, muß zunächst der gestörte Netzteil durch rasch wirkende Relais und sicher arbeitende Schaltgeräte so schnell wie möglich selektiv abgeschaltet werden. Bis zur Abschaltung jedoch, d. h. etwa 0,5 s lang, muß der Generator durch geeignete Auslegung und einer entsprechenden Regelung stabil bleiben.

In der Zeit bis zu 0,5 s nach dem Kurzschluß werden die Vorgänge im Generator von den Anfangs- und Übergangsreaktanzen beherrscht. Bild 8 zeigt den bekannten Verlauf der Kurzschlußströme ohne Gleichstromglied. Der Anfangswechselstrom J_k'' klingt sehr rasch ab und kann durch Stoßerregung nicht beeinflußt

werden. Der Kurzschlußstrom J'_k klingt mit der Zeitkonstanten $T_{J'_k}$ ab und ist durch eine rasche Regelung beeinflußbar, deren Zeitkonstante etwa gleich der doppelten bis dreifachen Zeitkonstante $T_{J'_k}$ ist. Die Kurven für J_k und J'_k können auch für den konstanten Erregerstrom bzw. für den automatisch im Generator entstehenden Stoßerregerstrom gelten (gestrichelte Kurven). Sieht man eine äußere Stoßerregung z. B. mit der doppelten Zeitkonstante T' und einem Endwert gleich dem Erregerstromsprung vor, so ergibt sich für den tatsächlichen Verlauf des Erregerstromes die strichpunktierte Kurve. Für die Ausführung einer derartigen Erregungseinrichtung gibt es zahlreiche Lösungswege, ohne daß sich bisher eine besondere Ausführung durchgesetzt hatte. Im allgemeinen werden Maschinen zur Erregung benutzt, für deren Schaltung Bild 9a, 9b, 9c einige prinzipielle Beispiele ohne Anspruch auf Vollständigkeit zeigt. Die einfache Anordnung mit Haupt- und Hilfserregermaschine genügt bei geblechtem Joch und genügend Leistungsreserve in vielen Fällen. Der getrennte raschlaufende Erregersatz ist dabei vorteilhafter als die langsamlaufende aufgebaute Erregermaschine. Die Anwendung einer Kompoundierung (direkt oder indirekt) ist sehr zweckmäßig und einfach, wird daher häufig (besonders in der Sowjetunion) mit gutem Erfolg angewandt. Das Verfahren mit Zu- und Gegenschaltmaschine ermöglicht wahrscheinlich die schnellste Regelung, besonders wenn Verstärkermaschinen angewendet werden. Es ist nicht ausgeschlossen, daß sich analog zu den Verfahren bei der Erregung von Gleichstromsteuergeneratoren — z. B. bei Walzwerksumformern — auch für die Erregung von Generatoren Gleichrichter mit Gittersteuerung durchsetzen.

4. Zusammenfassung

Der Ausbau der Wasserkräfte hat in allen Ländern der Welt in den letzten Jahren stark zugenommen. Die Sowjetunion plant eine Verdreifachung der Gesamtleistung der Wasserkräfte. Die Probleme beim Bau von Hydrogeneratoren sind sehr mannigfach. Bei kleinen Leistungen bis 2000 kVA überwiegen die technologischen Probleme und die Probleme zur Erzielung einer wirtschaftlichsten Gesamtanordnung, wobei auch der Antrieb des Fliehkraftpendels und der Erregermaschine einbezogen werden muß. Bei Leistungen über 800 kVA ist bereits der direkt angetriebene Generator wirtschaftlicher und betrieblich vorteilhafter als der über Getriebe angetriebene Generator. Die Konstruktion von Hydrogeneratoren großer Leistung und kleiner Drehzahl stellt zahlreiche technische Probleme mechanischer und elektrischer Art. Infolge des hohen Drehmomentes gehören diese Maschinen zu den größten und schwersten des Elektromaschinenbaues. Für große Durchmesser hat sich der Blechkettenläufer infolge des zuverlässigen Aufbaues und der einfachen Transportmöglichkeit durchgesetzt. Für Durchmesser bis 4 m wird häufig die Scheibenkonstruktion angewandt. Für Traglager bis 2000 t Axialbelastung sind Sonderkonstruktionen notwendig und werden besonders in der Sowjetunion für die Großbauten des Kommunismus entwickelt. Sehr häufig arbeiten Hydrogeneratoren auf lange Leitungen. Zur Erhöhung der Stabilität der Leitung ist es dann erforderlich, die Synchronreaktanz und die Übergangsreaktanz zu verkleinern, wodurch allerdings auch die Ausnutzung verringert wird. Aus dem gleichen Grunde muß der Entwicklung und Anwendung einer geeigneten rasch wirkenden Regelung zur Erhöhung der dynamischen und statischen Stabilität besondere Beachtung geschenkt werden.

7

Literatur

[1] *Kostjenko:* Die Probleme der Schaffung von Hochleistungshydrogeneratoren für die Großbauten des Kommunismus. Dtsch. Elektrotechnik 7 (1953) Heft 5.

[2] *Wenikov:* Wechselstromenergieübertragung auf große Entfernungen. Energietechnik 4 (1954) Heft 12.

[3] *Deicke:* Wechselstromfernübertragung mit Hilfe neuentwickelter Regler in der Sowjetunion. Dtsch. Elektrotechnik 8 (1954) Heft 12.

[4] *Rathsmann:* Stabilität und Blindleistung schwedischer Übertragungen. Bull. schweiz. el. Vereines, Bd. 45 (1954) Heft 14.

[5] *Berger:* Kurze Theorie der Energieübertragung und ihrer Stabilität. Bull. schweiz. el. Vereines, Bd. 45 (1954) Heft 10.

[6] *Heide, K.:* Das Moselkraftwerk Koblenz. AEG-Mitteilungen, Bd. 44 (1954) Heft 5/6.

[7] *Bobek, K.:* Große Polräder aus gestanzten Stahlblechsegmenten. VDI-Zeitschrift Bd. 85 (1941) Heft 18.

[8] *Müllner:* Elektrische Maschinen. ETZ/A (1954) Heft 18.

[9] *Widdmann:* Maßnahmen im Generatorenbau zur Steigerung der Betriebssicherheit. Elin-Zeitschrift VI, 1954.

[10] *Perusek:* Wasserkraftgeneratoren vertikaler Bauart. Elin-Zeitschrift III, 1951.

[11] *Klopfel:* Neuere Konstruktionen von Wasserkraftmaschinen. E. u. M. 62 (1944) Heft 7/8.

[12] *Strömberg:* Generators for the Harsprängel Power Nation. Asea Journal 1953.

[13] *Komar u. Jeremejew:* Die neuen Generatoren für das Dnepr-Kraftwerk. Westnik Elektropromyschlennosti (1940) Heft 11.

7.8 Verbesserung der Spannungskurve der Prüftransformatoren

Ob.-Ing. *Th. von Schiesl*, Dresden

In der VDE 0442 (Hochspannungsprüfung mit Wechselspannungen) wird gefordert, daß die Prüfspannung praktisch sinusförmig und ihre Frequenz im allgemeinen gleich der Nennfrequenz oder 50 Hz sein soll. Weiterhin wird in der VDE 0530 § 14 gesagt: „Eine Spannungswelle gilt als praktisch sinusförmig, wenn keiner ihrer Augenblickswerte a vom Augenblickwert der gleichen Phase der Grundwelle g (1. Harmonische) um mehr als 5% des Grundwellenscheitelwertes „S" abweicht.

Die Spannungskurve der Wechselspannungs-Prüfanlagen und insbesondere der Anlagen in Kaskadenschaltung weicht oft stark von der praktischen Sinusform ab. Um zu wissen, welche Maßnahmen zu der Verbesserung der Spannungskurve notwendig sind, muß man zunächst die Ursache der Spannungsverzerrung kennen.

Die Ursache der Spannungsverzerrung der Hochspannungstransformatoren bzw. der Kaskaden liegt in dem stark verzerrten Magnetisierungsstrom dieser Anlagen. Transformatoren mit eisengeschlossenem Kraftflußpfad nehmen einen stark verzerrten Magnetisierungsstrom auf, dessen Oberwellen unter Umständen erhebliche Oberwellen in der Netzspannung bzw. in der Spannungskurve der Oberspannung verursachen. Die Verzerrung der Spannungskurve kann im Speisenetz, im Regelaggregat oder im Hochspannungstransformator entstehen.

1. Spannungsverzerrungen des Speisenetzes

Die Hochspannungstransformatoren werden selten von einer „starren" sinusförmigen Spannung gespeist, die Speisung erfolgt meist über mehrere Zwischentransformatoren. Der verzerrte Magnetisierungsstrom durchfließt die Wirk- und Blindwiderstände der vorgeschalteten Transformatoren und erzeugt entsprechende Spannungsabfälle, die überdies noch, was die Induktivitäten angeht, der Ordnungszahl der Oberwellen proportional sind, so daß am Eingang des Regelaggregats keine sinusförmige Spannung mehr zur Verfügung steht. Die Verzerrung wird offenbar um so größer, je größer die Magnetisierungsströme und ihre Oberwellen sind.

2. Spannungsverzerrungen des Regelaggregats

Für größere Hochspannungsanlagen benutzt man entweder rotierende Prüfgeneratoren oder induktive Spannungsregler, sogenannte „Schubtransformatoren". Wenn man einen rotierenden Prüfgenerator als Spannungsregler benutzt, so entfällt natürlich die Übertragung der Spannungsverzerrung, die durch die Zwischentransformatoren entsteht; werden aber die Generatoren einphasig belastet, was allgemein der Fall ist, so können durch die unsymmetrische Belastung Spannungsverzerrungen entstehen. Darum werden Prüfgeneratoren zum Ausgleich der unsymmetrischen Belastung mit einer starken Dämpferwicklung versehen.

In den Schubtransformatoren entstehen allgemein die gleichen Spannungsverzerrungen wie in einem Zwischentransformator, wobei zu bemerken ist, daß die Schubtransformatoren, bedingt durch ihren Aufbau, eine verhältnismäßig hohe Streuung besitzen. Dazu kommt noch, daß bei Verschiebung des Kernes an den Nutübergängen noch höhere Streuflüsse entstehen, so daß an diesen Stellen eine besonders starke Spannungsverzerrung bei der Belastung des Schubtransformators entstehen kann.

3. Spannungsverzerrungen in Hochspannungstransformatoren bzw. Kaskaden

Durch den Aufbau der Hochspannungstransformatoren ist eine verhältnismäßig hohe Streuspannung bedingt. Werden mehrere Hochspannungstransformatoren hintereinander als Kaskade geschaltet, so erhöht sich die Streuspannung der Anlagen noch beträchtlich. Bei den hohen Streuspannungen derartiger Schaltungen werden aber die zur Erzeugung einer sinusförmigen sekundären Spannungskurve erforderlichen Oberwellen im Magnetisierungsstrom teilweise unterdrückt. Aus diesem Grund können bereits bei ziemlich niedrigen Induktionen Verzerrungen in der Spannungskurve entstehen. Dazu kann es vorkommen, daß die Oberschwingungen der Spannungswelle durch die Eigenkapazität des Prüftransformators allein oder auch zusammen mit einer fremden Kapazität und mit der Streuinduktivität des Transformators in Resonanz kommen. In solchen Fällen weicht die Oberspannung stark von der Sinusform und auch von der Spannungskurvenform der Unterspannung ab. Verzerrungen der Oberspannungskurve können auch durch hochfrequente Entladungen, die durch Gleitfunken im Prüfkreis hervorgerufen werden, entstehen.

Nachdem die Ursachen der Spannungsverzerrung aufgezeigt wurden, kann man die Methoden beschreiben, die zur Verbesserung der Spannungskurve führen.

Um auf der Hochspannungsseite des Prüftransformators eine gute sinusförmige Spannung zu erhalten, ist es wichtig, daß die Speisespannung praktisch sinusförmig ist. Die EMK der Speisegeneratoren kann man unabhängig von der Belastung heute wohl immer als praktisch sinusförmig annehmen. Es ist entscheidend, daß die Zwischentransformatoren bis zu der Prüfanlage so leistungsfähig sind, daß durch den stark verzerrten Magnetisierungsbedarf des Prüftransformators keine Verzerrung der Netzspannung entsteht. Weiterhin ist bei diesen dazwischengeschalteten Drehstromtransformatoren zu berücksichtigen, daß die Prüfanlagen meistens eine einphasige Belastung des Netzes erfordern. In bezug auf die Kurvenform sind demnach die Zwischentransformatoren so leistungsfähig auszulegen, wie es wirtschaftlich tragbar ist.

Die Verbesserung der Spannungskurve des Regelaggregats wird durch folgende Maßnahmen günstig beeinflußt:

Im § 10 VDE 0442, Hochspannungsprüfung mit Wechselspannung, steht folgendes über die Spannungskurve:

„Um die Verzerrung der Spannungskurve möglichst klein zu halten, sollen der Prüftransformator und etwa vorhandene Zwischen- oder Regeltransformatoren eine geringe Sättigung besitzen (höchstens etwa 12000 G bei Nennspannung)."

Um die zulässigen Streuflüsse und die dadurch auftretenden Spannungsverzerrungen bei der Verschiebung des Kernes an den Nutübergängen zu vermindern, werden bei den Schubtransformatoren die Anzahl der Nuten erhöht, wodurch die Flußkonzentration bei den Nutübergängen herabgesetzt wird.

Die Schubtransformatoren werden meistens für Drehstrom- und Einphasenschaltung umschaltbar ausgelegt. In Einphasenschaltung werden die drei Schenkel parallelgeschaltet. Die Kernstellungen der Schenkel sind so eingestellt, daß sie gegeneinander etwas verschoben sind. Durch diese Maßnahme erreicht man einen Ausgleich in der gemeinsamen Spannungskurve für die drei parallelgeschalteten Schenkel und dadurch einen besseren und verzerrungsfreieren Regelbereich.

Zur Verbesserung der Kurvenform des Regelaggregats kann man bei den Schubtransformatoren einen Zusatztransformator verwenden. Bei dieser Schaltung arbeitet der Schubtransformator in ±-Schaltung. Die konstante Spannung des Zusatztransformators ist in Reihe mit der geregelten Spannung des Schubtransformators geschaltet. Auf diese Weise ist es möglich, z. B. bei einer Schubtransformator-Sekundärspannung von ±300 V und einer Zusatztransformatorspannung von ebenfalls 3000 V, an den Sekundärklemmen des Regelaggregats eine Spannung von 0 bis 6000 V zu entnehmen. Die Schaltung hat den Vorteil, daß durch die immer vorhandene konstante Zusatzspannung die Spannungsverzerrungen des Schubtransformators, prozentual gesehen, in der Gesamtspannung weniger in Erscheinung treten. Dies trifft allerdings nicht in dem Regelbereich zu, in dem die Zusatzspannung und Schubtransformatorspannung sich gegenseitig annähernd oder sogar ganz aufheben.

4. Verbesserung der Spannungskurve der Hochspannungstransformatoren bzw. Kaskaden

Eine gute sinusförmige Spannungskurve der Hochspannungstransformatoren kann man durch verschiedene Methoden erreichen. Bereits bei der Auslegung der Transformatoren muß darauf Wert gelegt werden, eine gute Spannungskurve zu erhalten, wobei natürlich wirtschaftliche Gesichtspunkte nicht außer acht gelassen werden dürfen. Um die Verzerrungen der Spannungskurve klein zu halten sowie Resonanzerscheinungen zu vermeiden, muß bei der Auslegung der Hochspannungstransformatoren folgendes berücksichtigt werden:

Die Streuspannung der Hochspannungstransformatoren soll klein sein. Bei Kaskadenschaltungen gilt dies sinngemäß auch für die Kopplungswicklungen. Je kleiner die Streuspannung der Anlage ist, um so kleiner werden naturgemäß auch die Spannungsabfälle an den Blindwiderständen, die durch den verzerrten Magnetisierungsstrom verursacht werden. Bei Verkleinerung der Streuung wird außerdem auch die Gefahr der Resonanz gemindert. Bei der Auswahl des Kernmaterials ist darauf zu achten, daß kein Blech mit zu hohen Wattverlusten verwendet wird. Noch wichtiger ist aber, daß bei den maximal vorkommenden Induktionen die Bleche eine noch genügend hohe Permeabilität besitzen. Wie bekannt, erreichen die Transformatorenbleche bei etwa 6000 G ihre Maximalpermeabilität, und die Permeabilität fällt bei steigender Induktion flacher oder steiler, je nach der Blechsorte ab. Es ist nun einleuchtend, daß die Verzerrungen der Spannungskurve um so größer werden, je größer die Magnetisierungsströme und ihre Oberwellen sind. Darum ist es sehr erwünscht, daß bei den maximal vorkommenden Induktionen (10000 bis 12000 G) die Transformatorenbleche eine möglichst hohe Permeabilität besitzen.

Aus den obengenannten Gründen geht ebenfalls hervor, daß die maximale Sättigung der Transformatoren unter keinen Umständen über 12000 G betragen darf.

Auch durch Luftspalte [illegible] der Hochspannungstransformatoren kann man die Spannungskurve verbessern. Durch die Luftspalte im magnetischen Kreis erhält man die induktive Leerlaufaufnahme des Prüftransformators, erreicht aber gleichzeitig durch die infolge des Luftspalts lineare magnetische Charakteristik einen Magnetisierungsstrom mit bedeutend weniger Oberwellen. Der Hauptvorteil dieser Anordnung besteht jedoch darin, daß durch die erhöhte induktive Stromaufnahme die meistens vorhandene kapazitive Stromaufnahme der Anlage kompensiert wird und so eine Entlastung des Erregertrafos des Prüftrafos erfolgt. Der Nachteil dieser Schaltung ist, daß erstens die Einstellung des richtigen Luftspalts meistens nur durch mehrmaligen Ausbau des Prüftrafos erreicht wird und zweitens, wenn man die maximale Induktion nicht niedrig genug wählt, kann es vorkommen, daß die Hochspannungsanlage bereits vor der Nennspannung für die Grundwelle induktiv wird. Von hier ab ist natürlich keine Kompensation mehr möglich.

Eine Verbesserung der Kurvenform der Prüftransformatoren läßt sich auch durch Reihen- oder Parallelschaltung von Induktivitäten (Luftspaltdrosseln) in die primären Speiseleitungen oder in die Schaltverbindungen erreichen. Die Reihendrossel kompensiert einerseits den kapazitiven Strom, hält aber durch seinen [illegible] ohmschen Widerstand die Oberwellen aus dem Netz zurück. Der Nachteil der Reihendrossel ist die Erhöhung der Kurzschlußspannung und die Spannungserhöhung an der Drossel bei Prüfungsüberschlägen. Parallelschaltung einer Luftspaltdrossel zu den Klemmen des Prüftransformators ergibt eine gute Sinusform der Hochspannung, wenn auf Resonanz für die Grundwelle abgestimmt wird. [illegible] der Drossel muß so eingeregelt sein, daß die Summe der Streuinduktivitäten des Regulators des Transformators und der Drosselspulenindukt[illegible] [illegible] Belastungsgrenze für die Grundwelle Resonanz ergibt. [illegible] dieser Schaltung ist, daß sie lastabhängig ist und versteilert [illegible] Regulator empfindlich wird die Schaltung, wenn die vor[illegible] auf Hochspannungspotential an den Schaltverbindungen der Trans[illegible] angeschlossen werden muß.

[illegible] Verbesserung der Spannungskurve der Hochspannungstransformatoren [illegible] man durch Anhängen von Parallel- oder Reihenresonanzkreisen [illegible] den Klemmen der Erregerwicklung oder zu den Klemmen der einzelnen [illegible].

[illegible] Parallelresonanzkreise stellen bekanntlich einen hohen Widerstand für die [illegible]frequenz dar, dagegen ist der Widerstand dieser Kreise unterhalb und [illegible] oberhalb der Resonanzfrequenz verhältnismäßig gering. Aus diesem Grunde muß die Resonanzfrequenz dieser Kreise auf 50 Hz (gleich Nennfrequenz) abgestimmt sein, damit der Grundwellenstrom des Hochspannungstransformators hier nicht durchfließen kann, dagegen die Oberwellen durch diesen praktischen Kurzschluß fließen können.

Trotz der theoretischen Vorzüge der Parallelresonanzkreise sind sie in der Praxis mit Nachteilen verbunden. In erster Linie muß die Kapazität des Resonanzkreises möglichst hoch gewählt werden, damit der Oberwellenstrom über die Kapazität fließen kann. Bekanntlich ist der Widerstand einer Kapazität $R_S = \frac{1}{\omega C}$.

Da die Kondensatoren, die für die vollen Erreger- bzw. Schubwicklungsspannungen bemessen sein müssen, verhältnismäßig teuer sind, bedeuten Parallelsieb-

kreise in den Hochspannungsanlagen eine nicht zu vernachlässigende finanzielle Belastung.

Ein weiterer Nachteil des Parallelresonanzkreises besteht darin, daß die Induktivitäten der Resonanzkreise parallel zu den Induktivitäten der Erreger- bzw. Schubwicklungen geschaltet werden. Die Induktivität der Transformatorenwicklungen ändert sich aber bei den verschiedenen Erregerspannungen, wodurch

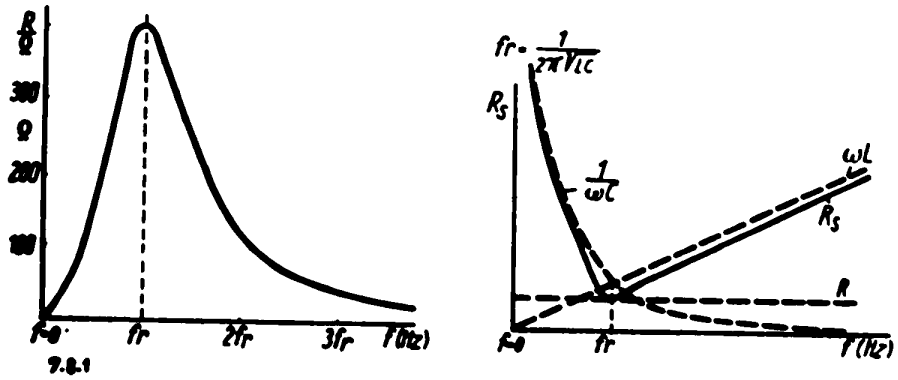


Bild 1

a) Kennlinie eines Parallelresonanzkreises; Widerstand als Funktion der Frequenz; *b)* Frequenzabhängigkeit des Scheinwiderstandes für die Reihenresonanz

die Parallelresonanzkreise verstimmt werden. Es ist einleuchtend, daß die Verstimmung der Resonanzkreise um so kleiner wird, je größer die Resonanzkreisinduktivitäten im Verhältnis zu den Wicklungsinduktivitäten des Transformators gewählt werden.

Zur Erzielung einer sinusförmigen sekundären Spannungskurve bei den Hochspannungstransformatoren ist es auch möglich, wie bereits erwähnt, Reihen-

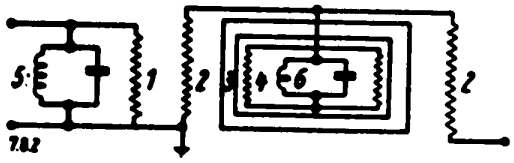


Bild 2. Die Prinzipschaltung eines Hochspannungstransformators, ausgerüstet mit zwei Parallelresonanzkreisgliedern

1 Erregerwicklung; *2* Hochspannungswicklung; *3* Eisenkern; *4* Schubwicklung; *5* und *6* Sperrkreise für 50 Hz

resonanzkreise zu verwenden, wobei die Resonanzkreise für die Frequenzen der kurzzuschließenden Oberwellen abgestimmt werden.

Bei Transformatoren in Kaskadenschaltung ist es möglich, in jeder Kaskadenstufe Resonanzkreise für den Kurzschluß von Oberwellen anzuordnen, die an Kopplungswicklungen oder Schubwicklungen angeschlossen sind und jeweils das Potential der betreffenden Kaskadenstufe erhalten. Dadurch können die Siebschaltungen mit ihren Schaltelementen für die verhältnismäßig niedrige Spannung der Erreger-, Kopplungs- oder Schubwicklungsspannung ausgelegt werden. Es ge-

nügt im allgemeinen, wenn man Resonanzkurzschlüsse für die dritte und für die fünfte Oberwelle vorsieht. Aus der Kurve (Bild 1b), in der die Frequenzabhängigkeit des Scheinwiderstandes für die Reihenresonanz gezeigt wird, ist zu ersehen, daß der Schwingkreis für seine Resonanzfrequenz ω_r praktisch keinen Widerstand besitzt, d. h. einen Kurzschluß bedeutet. Für die tieferen bzw. höheren Frequenzen als ω_r bedeutet der Schwingkreis einen verhältnismäßig hohen und nach beiden Richtungen von ω_r ansteigenden Widerstand. Für die Güte des Schwingkreises

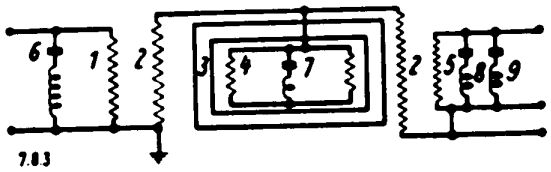


Bild 3. Glied einer Hochspannungskaskade mit Reihenresonanzgliedern ausgerüstet

ist entscheidend, daß der ohmsche Widerstand der Induktivität niedrig ist. Bei der Festlegung der Schaltelemente für die Reihenresonanzkreise ist darauf zu achten, daß für die Resonanzfrequenz „Spannungsresonanz" entsteht und die Isolation der Kondensatoren und Luftspaltdrosseln entsprechend ausgelegt ist. Zur Verbesserung der Spannungskurve von Hochspannungs-Wechselstrom-Anlagen,

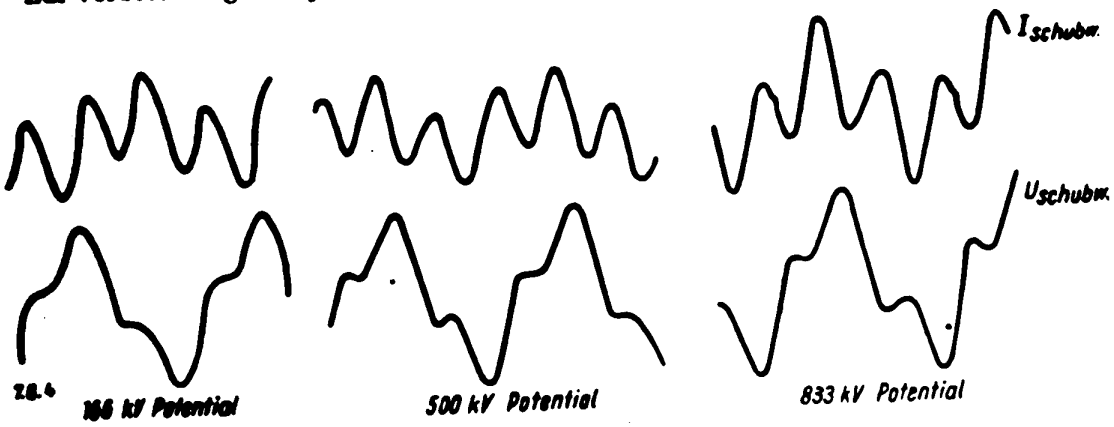


Bild 4

insbesondere in Kaskadenschaltung, ist in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht die Anwendung von Reihenresonanz-Siebgliedern vorteilhaft. Aus diesem Grunde wird bei der Durchführung der praktischen Untersuchungen besonderer Wert auf die Untersuchung der Spannungskurve von Anlagen mit Reihenresonanz-Siebgliedern gelegt.

Schließlich sei noch erwähnt, daß es möglich ist, eine Verbesserung der Spannungskurve der Hochspannungstransformatoren zu erreichen, wenn der Oberwellenstrom für den Magnetisierungsbedarf (hauptsächlich die dritte und fünfte Oberwelle) durch getrennte Frequenzgeneratoren geliefert und dem Strom mit der Grundfrequenz überlagert wird. Um die Phasenfolge der Oberwellen richtig einstellen zu können, ist es zweckmäßig, die Frequenzgeneratoren gleichzeitig mit

einem Phasenschieber vorzusehen. Es ist auch denkbar, die Frequenzgeneratoren auf Hochspannungspotential anzuordnen, wo die Generatoren entweder durch isolierte Wellen angetrieben werden oder die Speisung von einer bestimmten Erregung an durch Schaltschütze von den Schubwicklungen erfolgt. Gegenüber den Siebschaltungen mit mechanisch ruhenden Schaltelementen bietet die Spannungsverbesserung durch Frequenzgeneratoren keine Vorteile.

Verzerrungen der Oberspannungskurve, die durch hochfrequente Entladungen entstehen, kann man wirkungsvoll durch Einschalten eines ohmschen Widerstandes beseitigen. Der Widerstand liegt zwischen dem Prüftransformator und Prüfling (s. VDE 0442 § 13).

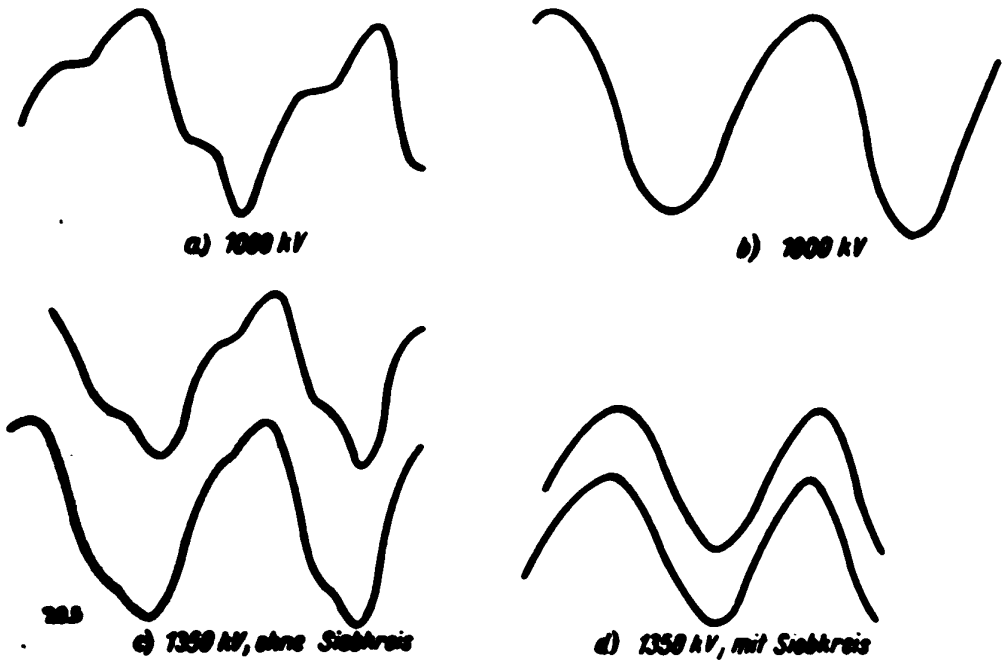


Bild 5

Wie bereits erwähnt, ist aus den Kennlinien (Bild 1a und 1b) zu ersehen, daß bei dem Parallelresonanzkreis der Scheinwiderstand bei einer Resonanzfrequenz sein Maximum erreicht, dagegen beim Reihenresonanzkreis der Scheinwiderstand ein Minimum hat.

Die praktischen Untersuchungen wurden an verschiedenen 1-MV-Hochspannungskaskaden und an einer 1,5-MV-Kaskade durchgeführt (Bild 2 und 3).

Nachdem die anfänglichen Versuche gezeigt haben, daß sich aus wirtschaftlichen und auch praktischen Gründen mit den Reihenresonanzkreisen die günstigsten Ergebnisse erzielen lassen, werden die Arbeiten nur mit diesen Resonanzkreisen weitergeführt.

Die Oszillogramme (Bild 4) zeigen die Ströme der Schubwicklungen einer Dreier-Hochspannungs-Kaskade. Die Ströme sind auf verschiedene Potentiale aufgenommen. Alle Stromkurven zeigen erwartungsgemäß eine starke 3. Oberwelle, bedingt durch den nichtlinearen Magnetisierungsbedarf des Eisens. In den Oszillogrammen

unten sind Spannungen der Schubwicklungen aufgenommen. Man sieht, daß die Schubwicklungsspannungen mit steigendem Potential immer mehr verzerrt werden.

Das prozentuale Oberwellenanteil der Ströme ist dabei umgekehrt proportional der Spannungshöhe. Das erklärt sich daraus, daß der oberste Transformator nur den eigenen Magnetisierungsbedarf durch den Leerlaufstrom zu decken hat, während

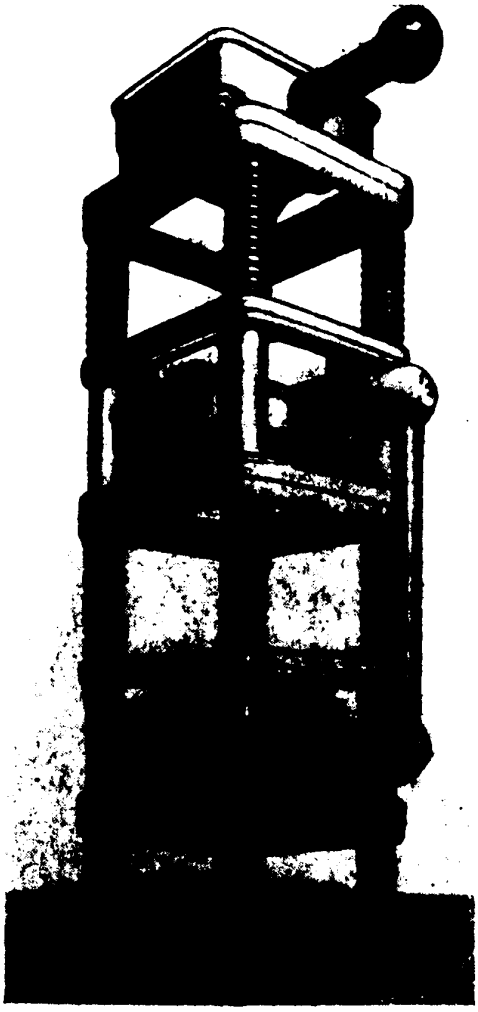


Bild 6

die unteren Kaskadenglieder auch für den Magnetisierungsstrom der oberen Transformatoren aufkommen müssen.

Bild 5a zeigt die Hochspannung einer 1-MV-Anlage ohne Siebglieder bei 1 MV. Die Induktion dieser Anlage war bei der Nennspannung etwa 14000 G, wodurch auch die starke verzerrte Spannung zu erklären ist. Die Hochspannung derselben Anlage bei gleicher Spannung (und Induktion) zeigt Bild 5b, wobei die Anlage mit je einem Siebkreis für die 3. Oberwelle auf 166 und auf 500 kV Potential

sowie mit einem Siebkreis für die 5. Oberwelle auf das 834-kV-Potential ausgerüstet war. Die Verzerrung der Spannungskurve beträgt weniger als 5 %.

Die Oszillogramme (Bild 5c und d) zeigen die Primär- und Sekundärspannung einer 1,5-MV-Hochspannungsanlage, ohne und mit Siebkreis für die 3. Oberwelle. Die Spannungen sind bei etwa 1,35 MV aufgenommen worden, hier sieht man eindeutig die gute Wirkung der Siebkreise.

Die folgenden Bilder zeigen einige Aufnahmen von Hochspannungsanlagen, in denen zum Teil bereits die Siebglieder eingebaut sind.

Bild 6 zeigt eine Kaskade für 1 MV, fahrbar mit übereinandergebauten Transformatoren.

Die Siebglieder sind hier an der Rückseite der Transformatoren angebaut, so daß man sie auf dem Bild nicht sehen kann.

In Bild 7 sieht man ein Glied einer 1,5-MV-Wechselspannungskaskade. Die Siebglieder wurden für Versuchszwecke provisorisch angeschlossen.

Eine Dreierkaskade für 1 MV mit angebauten Siebgliedern zeigt Bild 8.

Die erforderlichen Kondensatoren und Drosseln für die Siebglieder sind unmittelbar unter die Hochspannungstransformatoren angebaut, so daß sie überhaupt keinen zusätzlichen Raum benötigen. Auf dem Bild sind lediglich die Ölausdehnungsfäße der Drosseln zu sehen.

Aufgabe dieser verhältnismäßig kurzen Ausführungen war es, einen Überblick über die Entstehung und Vermeidung von Spannungsverzerrungen bei Prüf-

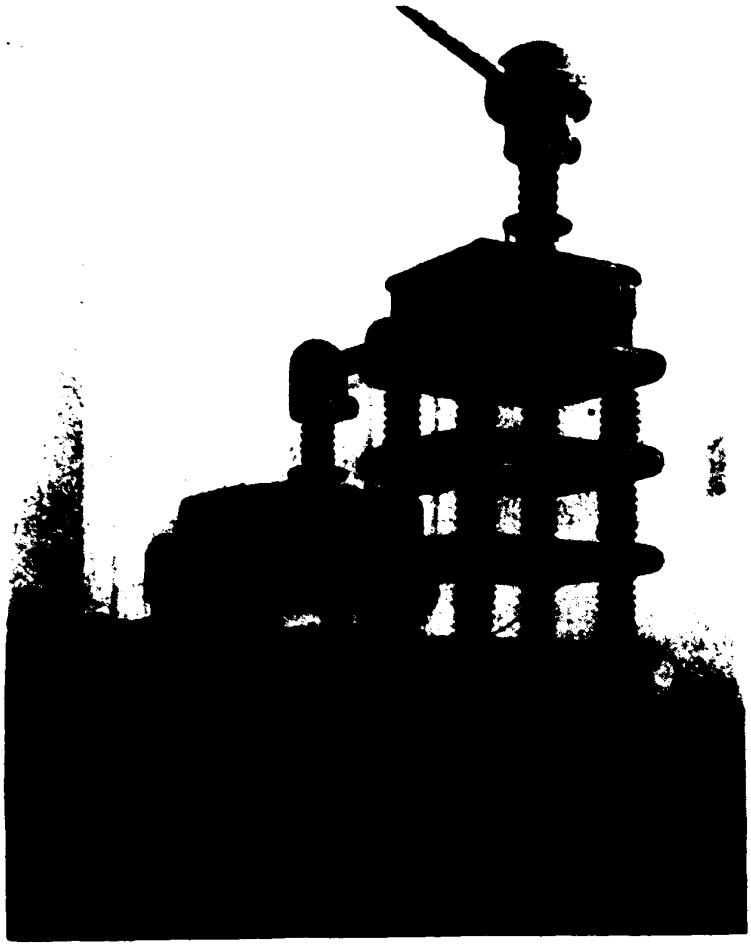


Bild 8

transformatoren zu geben. Welche Methode beim Bau der Prüfanlagen berücksichtigt wird, bleibt dem Konstrukteur überlassen und ist nicht zuletzt von wirtschaftlichen Gesichtspunkten abhängig. In jedem Fall aber müssen die Prüfanlagen nach dem Stand der Technik so ausgelegt sein, daß die Spannungskurve der Hochspannung bei beliebiger Belastung praktisch sinusförmig ist.

7.9 Willkürliche Auslösung von Stoßanlagen

Ing. *K.-F. Dummer*, Dresden

1. Aufgabenstellung

Stoßprüfungen an Isolationsanordnungen sollen deren Festigkeit gegen natürliche Überspannungen unter Beweis stellen. Die heute dazu gebrauchten Stoßgeneratoren gehen im wesentlichen auf die Marxsche Vervielfachungsschaltung zurück unter Anwendung einer Hintereinanderschaltung von Stoßkreisen. Ein derartiger Stoßkreis besteht im wesentlichen aus einem Stoßkondensator C_s, in dem die benötigte Energie gespeichert wird, einer Zündfunkenstrecke Z_F und den

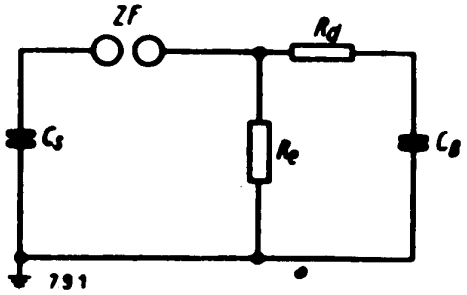


Bild 1. Stoßschaltung

Widerständen R_d und R_e, die die Form der Stoßwelle bestimmen, zusammen mit der Belastungskapazität C_b, die aus Prüfling, Erdkapazitäten, evtl. Meßanordnungen und zugeschalteten Kapazitäten besteht (Bild 1). Früher erfolgte die Auslösung allgemein dadurch, daß der Stoßkondensator über einen Dämpfungswiderstand langsam aufgeladen wurde, bis die der Einstellung der Funkenstrecke entsprechende Spannung erreicht war. Der Scheitelwert der Stoßwelle wurde mit Meßfunkenstrecken ermittelt, die parallel zum Prüfling geschaltet waren. In der weiteren Entwicklung konnte man sich aber damit nicht begnügen. Es wurde die Forderung gestellt, auch den mit Betriebsspannung erregten Prüfling zu stoßen. Das erfordert aber, um eindeutige Verhältnisse zu haben, daß dieses in einer bestimmten Phasenlage des Erregerstromes geschieht. Das zwingt wiederum dazu, die Auslösung der Stöße willkürlich zu bewirken. Dabei werden an die zeitliche Genauigkeit der Auslösung noch keine besonders hohen Anforderungen gestellt. Die US-Standards fordern z. B. einen Zeitbereich von 30 elektr. Grad um den Scheitelwert der 60-Hz-Grundwelle. Es besteht ferner auch das Bedürfnis, sich ein Urteil über den Ort und evtl. auch die Art eines Durchschlages zu bilden. Man nimmt dazu Oszillographen mit einmaliger Ablenkung. Diese benötigen eine gewisse Vorlaufzeit, d. h. um die Aufnahmebereitschaft herzustellen muß eine gewisse Zeit zwischen der Auslösung und dem Erscheinen des Vorganges an den Ablenkplatten

des Gerätes verstreichen. Zur Beobachtung von Einzelheiten auf dem Stoßoszillogramm sind dabei hohe Schreibgeschwindigkeiten nötig, das bedeutet aber auch kurze Beobachtungszeiten und erfordert entsprechend genaue Einhaltung der Auslösezeit. Weitere Anforderungen werden noch durch ein neueres Beobachtungsverfahren gestellt: Die Beobachtung des Stromes, der bei der Stoßspannungsprüfung durch den Prüfling fließt, ergibt ebenfalls Aufschlüsse über den Ort eines Durchschlages in diesem. Es ist nun, wie *Rabus* gezeigt hat, möglich, mit zwei Stoßanlagen gleichzeitig den Prüfling und ein elektrisch einwandfreies Vergleichsstück zu stoßen und den Meßplatten des Oszillographen die Differenz der Spannungen, die an den für die Strommessung eingeschalteten Widerständen liegen, zuzuführen. Abgesehen davon ist es für eine sichere Beobachtung der Vorgänge wünschenswert, die Auslösung des Stoßes in die Hand des Prüfenden zu legen.

Welche Forderungen sind nun an eine Auslöseeinrichtung zu stellen? Für die Anlaufzeit des Oszillographen und das Schreiben eines Stückes der Zeitachse vor dem Beginn des Stoßes muß ein Zeitvorlauf von etwa 1 μs gewonnen werden. Die zeitliche Genauigkeit der Auslösung ist von der Größe des vorgesehenen Beobachtungsintervalles abhängig; da für die Beobachtung der Stirn der Stoßwelle das Bildfeld in etwa 5 ··· 8 μs überfahren wird, soll die zeitliche Streuung 1 μs nicht überschreiten, damit der Vorgang im Bildfeld sicher wiedergegeben wird. Der Auslöseimpuls soll die Stoßanlage sicher zünden. Diese soll aber auch nicht bis zum selbsttätigen Überschlag aufgeladen sein. Dabei ist es wünschenswert, mit Impulsen möglichst geringer Amplitude auszukommen.

2. Wege zur Lösung

Bei der willkürlichen Auslösung handelt es sich im Prinzip darum, einen Kreis (Bild 1), der bis nahe zum Überschlag der Funkenstrecke aufgeladen ist, zum Überschlag dieser Strecke zu bringen. Wegen der kurzen Zeit des Vorganges scheiden mechanische Schaltmöglichkeiten aus, es bleibt die Verwendung von elektronischen Impulsen geeigneter Flankenstellheit.

Der Überschlag der Kugelfunkenstrecke kann auf zwei Wegen erzwungen werden. Einmal kann man den an den Elektroden liegenden Potentialunterschied durch den Auslöseimpuls über die zur Einleitung des Durchschlages nötige Spannung erhöhen, zum anderen läßt sich die Durchschlagsfestigkeit der Elektrodenanordnung erniedrigen. Eine solche Schwächung läßt sich z. B. durch Teilung der einen Elektrode und Anlegen einer Spannung an die in die Nähe der Überschlagsstelle gelegten Trennstelle durch Feldverzerrung erreichen.

Es gibt mehrere Wege, den Auslöseimpuls an den Stoßkreis zu bringen.

2.1. An der Funkenstrecke selbst kann man die zum Durchbruch führende Spannungserhöhung dadurch erzeugen, daß man die erdseitige, aber von Erde durch einen hohen Widerstand getrennte Elektrode durch einen Impuls von zur Ladung des Stoßkondensators entgegengesetzter Polarität aufdrückt (Bild 2). Eine von *Hener* angegebene Schaltung zeigt ein solches Beispiel. Zum Schutz des erwähnten Widerstandes wird der Entladestrom über eine dritte Elektrode, die unmittelbar an der Erdverbindung liegt, geleitet.

2.2 Eine weitere Möglichkeit ergibt sich durch Erhöhen der Spannung im Stoßkondensator. Es ist im Grunde das gleiche wie bei der alten, bei Erreichen der Überschlagsspannung sich selbst auslösende Stoßanlage. Legt man den Stoß-

kondensator über einen genügend hoch bemessenen Widerstand an Erde, so kann man dort mit einem Hilfskondensator eine zusätzliche Spannung aufprägen und somit die Auslösung des Kreises erzwingen.

2.3. Als drittes Mittel zur Auslösung bietet sich die Anzapfung des Entladewiderstandes R_e von Bild 1. Man löst hier aus durch Aufprägen eines Impulses mit Gegenpotential zur Ladespannung des Kreises.

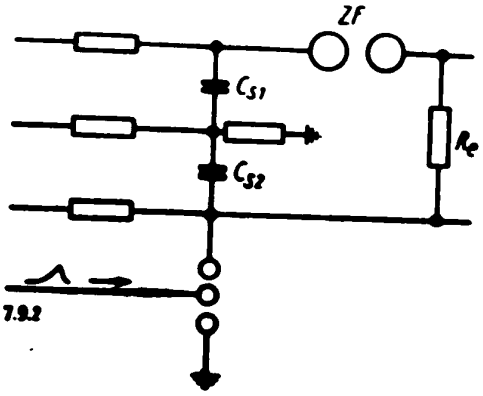


Bild 2. Elsner-Schaltung

Bei mehrstufigen Anlagen braucht nur der erste, an Erde liegende Kreis ausgelöst zu werden, da nach seinem Ansprechen die Anlagen fast immer durchzünden bzw. Schaltmittel bekannt sind, die die Durchzündung erzwingen. Interessant ist aber dabei eine Schaltung von *Elsner*, die zur Auslösung in jeder Stufe Drei-Elektroden-Strecken verwendet.

Der Auslöseimpuls selbst kann in einer einstufigen Stoßschaltung erzeugt werden. Es gibt bereits zur Beobachtung von Stoßvorgängen bestimmte Oszillographen, die einen Kreis enthalten, der Stöße mit einem Scheitelwert von 10 bis [illegible] abgeben kann. Um eine kleine Streuung der Zeit bis zur Auslösung zu erhalten, ist es notwendig, in ihnen besonders exakt arbeitende Schaltmittel (ZF) zu haben. Als solche eignen sich Drei-Elektroden-Funkenstrecken und Stromtore (Thyratrons). Sie werden ihrerseits durch denselben Steuerimpuls niedriger Spannung betätigt, der etwa vom Steuerpult der Gesamtanlage durch den Bedienenden ausgelöst wird und auch die Zeitachse und Strahlsperre des Oszillographen auslöst. Es ist auch möglich, den Auslöseimpuls über einen Impulstransformator aus dem Steuerimpuls zu gewinnen.

3. Das Arbeiten mit willkürlicher Auslösung

Eine Stoßanlage mit willkürlicher Auslösung ist in Bild 3 (Schema) dargestellt. Sie besteht im wesentlichen aus der Steuerschaltung im Schaltpult bzw. Oszillographen, einem phasenabhängigen Glied zur Festlegung des Zündzeitpunktes in einer beliebigen Stelle der Periode der angelegten Wechselspannung, in einem Generator für den Auslöseimpuls und einer Verzögerungsleitung zum Stoßgenerator, die dazu dient, den nötigen Zeitverlauf für den Oszillographen zu erzeugen, der direkt mit dem Erzeuger des Auslöseimpulses verbunden wird.

Die Arbeit mit einer solchen Einrichtung verläuft etwa nach folgendem Schema: Die Zündfunkenstrecke der Anlage wird entsprechend der dem Prüfling zu gebenden Stoßspannung so eingestellt, daß noch eine Überschlagssicherheit von etwa 5% verbleibt. Die Aufladung des Stoßgenerators erfolgt in der üblichen Weise über Dämpfungswiderstände durch einen Gleichrichter. Ihr Ladezustand ist durch Instrumente beobachtbar. Ist volle Ladung erfolgt, so kann von Hand eine Auslösung betätigt werden, die den Auslöseimpuls freigibt. Wird dabei der Prüfling mit Betriebsfrequenz erregt, so gibt das phasenabhängige Glied entsprechend frei. Der Auslöseimpuls löst nun zuerst den Oszillographen und nach Ablauf von dessen

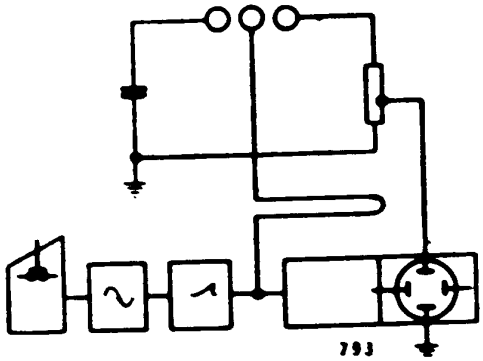


Bild 3. Stoßanlage mit willkürlicher Stoßauslösung

Vorlaufzeit auch die Anlage aus. Es ist möglich, die Auslösung von der Erreichung der vollen Aufladung des Generators elektrisch abhängig zu machen.

Bei Versuchen mit einer Einrichtung, aufgebaut nach Schema 2.1, durch Zündung an der Zündfunkenstrecke mit einer Kalottenelektrode ließ sich die Anlage sicher auslösen, soweit sie nur auf 90% der sonst zum Überschlag erforderlichen Spannung aufgeladen war. Der Impuls hatte dabei den üblichen Scheitelwert.

Beim praktischen Arbeiten mit der Auslöseeinrichtung können sich Schwierigkeiten ergeben. Sie liegen meist an einer geringen Zündwilligkeit des Stoßgenerators und sind nicht der Auslösung selbst zur Last zu legen. Zu ihrer Vermeidung wendet man die üblichen Mittel an, so z. B. die Veränderung der Zündfunkenabstände in den nachfolgend zu schaltenden Kreisen bzw. Hilfsverbindungen über Entladewiderstände zwischen den einzelnen Stufen. *Elmer* gibt als Hilfsmittel an, sämtliche Zündfunkenstrecken in den einzelnen Kreisen als Drei-Elektroden-Strecke auszuführen.

7.10 Messung der Fehlergrößen von Stromwandlern und der Verlustfaktoren von Transformatoren mit einem Bereichswandler

Von Dipl.-Ing. *F. Schubert*, Dresden

1. Einleitung

Es ist schon viel über Stromwandler und ihre Messung geschrieben und gesprochen worden, daß es fast so scheint, als sei auf diesem Gebiete kaum noch Neues zu erwarten. Das ist glücklicherweise nicht der Fall. Diese kleinen Helfer der Energieversorgung bei ihrer Verrechnung und besonders beim Schutze unserer kostbaren Generatoren und Transformatoren, die lange Zeit etwas am Rande der großen Entwicklung standen, machen durch neue Spezialeisensorten und besonders durch die Gießharzisolierung zur Zeit viel von sich reden. Auch die Forderung nach Großbereichswandlern, die den Meßbereichen der modernen Großbereichszähler entsprechen, wird immer lauter. Auf dem Gebiete der *Messung* sind in den letzten Jahren viele neue Vorschläge gemacht und Methoden entwickelt worden, so daß es schwer möglich ist, eine weitere Methode zu schildern, ohne die bekannten bewährten Verfahren kurz zu erwähnen, ihre Kennzeichen hervorzuheben, ihre Vorteile und ihre Schwierigkeiten darzustellen.

2. Bekannte Methoden der Stromwandlermessung

2.1 *Allgemeines*

Um bei der Beschreibung der bekannten Verfahren nun nicht gar zu weit in die Breite gehen zu müssen, möchte ich mich auf diejenigen beschränken, die in der Eichanweisung des Deutschen Amts für Maß und Gewicht (DAMG) vom 1. März 1949 erwähnt sind. Dort werden zwei Gruppen unterschieden, die nach dem *Kompensations-* und die nach dem *Differential*verfahren arbeiten.

2.2 *Kompensationsverfahren*

Die bekannte, immer wieder verwendete, von *Schering* und *Alberti* vorgeschlagene Schaltung zeigt Bild 1. Ich möchte dabei das *absolute* Verfahren mit einem Normalwiderstand übergehen und sogleich von der Messung mit einem Normalstromwandler sprechen.

Der Primärstrom I_1 durchfließt die Primärwicklungen des Normalwandlers N und des Prüflings X. Ihre beiden Sekundärströme verursachen an den beiden Normalwiderständen R_N und R_X gleiche Spannungsabfälle, von denen bestimmte Teilbeträge miteinander verglichen werden.

Die Fehlergrößen des Prüflings rufen eine Spannung am Vibrationsgalvanometer hervor, die durch Verstellung eines Schleifdrahtes und eines Kondensators kompensiert werden kann. Aus der Stellung des Schleifdrahtes und der Größe der Kapazität ergibt sich dann unmittelbar der Stromfehler und der Fehlwinkel des Prüflings. Allgemein üblich ist, daß 1 μF 100 min entspricht. Dabei ist allerdings

notwendig, wenn die Teile des Meßzweiges die in Bild 2 angegebenen Werte haben, bei negativen Fehlwinkeln die Ablesung der Kapazität zu halbieren.

Um die dadurch leider oft auftretenden Fehlmessungen zu umgehen, wurde im Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden der ebenfalls in Bild 2 gezeigte Aufbau des Meßzweiges eingeführt, bei dem auch für negative Fehlwinkel die Kapazitätsablesung ohne Umrechnung gültig ist. Die Empfindlichkeit der jetzt zur Verfügung stehenden Vibrationsgalvanometer reicht bei der nur geringeren Spannung noch völlig aus.

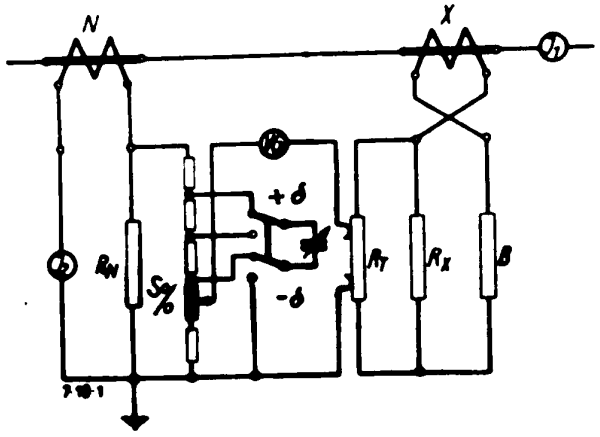


Bild 1. Stromwandlermessung im Kompensationsverfahren (Schering-Alberti)

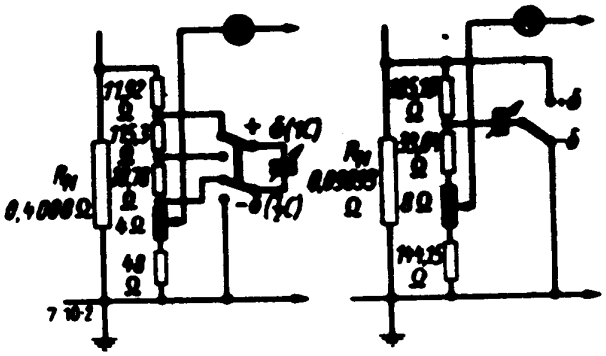


Bild 2. Meßzweig beim Kompensationsverfahren

Sind die Übersetzungen von Normalwandler und Prüfling *nicht* gleich, so kann ein entsprechender Teilbetrag der Spannung an R_X über den Teiler R_T abgegriffen werden. Nachteilig ist dabei, daß beim Verschieben der unteren Teileranzapfung die Sekundärseite des Prüflings nicht mehr niederohmig geerdet ist.

Die Belastung des Prüflings durch den Normalwiderstand R_X der Meßeinrichtung läßt sich mit Rücksicht auf das Vibrationsgalvanometer kaum unter einen Wert von 1 VA bringen. Eine Messung bei ungleichen Übersetzungen ist möglich.

2.3 *Differentialverfahren*

Bild 3 zeigt eine von *Hohls* angegebene Schaltung, mit der Stromwandler im Differentialverfahren gemessen werden.

Die Sekundärströme des Normalwandlers und des Prüflings fließen in einem *gemeinsamen* Stromkreis. Nur ihr *Differenz*strom fließt über den Differentialwiderstand R_D, an dem er eine Spannung erzeugt. Diese wird durch zwei an den beiden Schleifdrähten S_0 und S_1 abgenommene, um 90° gegeneinander gedrehte Spannungen gemessen. Der Schleifdraht S_0 liegt im Sekundärstromkreis; seine Spannung ist mit dem Sekundärstrom in Phase. Die Spannung an S_1 wird über die Gegeninduktivität GI erzeugt und ist gegen den Sekundärstrom um 90° phasenverschoben. Die Anpassung der Schleifdrahtablesung an die verschiedenen Klassen der Prüflinge geschieht durch Anzapfungen am Differentialwiderstand R_D.

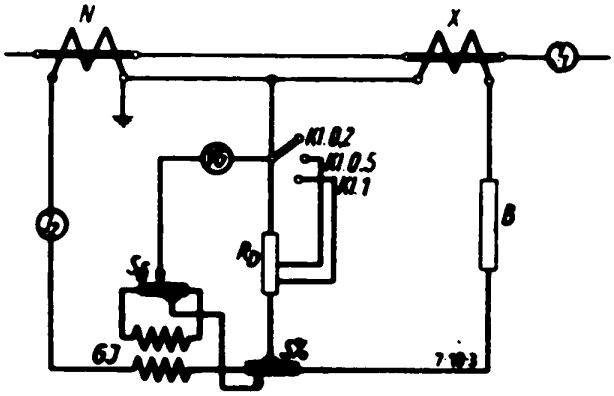


Bild 3. Stromwandlermessung im Differentialverfahren (Hohls)

Die durch die Meßeinrichtung auftretende Belastung des Prüflings ist bei diesem Verfahren wesentlich kleiner als bei dem zuerst beschriebenen; doch bleibt eine geringe Bürde durch den Differentialwiderstand bestehen. Eine Messung bei ungleichen Übersetzungen ist nicht ohne weiteres möglich.

2.4 *Verfahren mit Differentialringwandler*

Diese in Bild 4 gezeigte Meßanordnung hat als Vergleichsglied für die Sekundärströme des Normals und des Prüflings einen Differential-Ringstromwandler W_D, der bei Gleichheit beider Ströme ohne Erregung ist, so daß das ebenfalls an ihm liegende Vibrationsgalvanometer VG ohne Ausschlag bleibt.

Die Fehlergrößen des Prüflings können durch *Zusatzströme* in dem Wandler W_D gemessen werden. Diese werden einem Schleifdraht entnommen und durch ohmsche und kapazitive Vorwiderstände in ihrer Phasenlage bestimmt. Ihre Größen, die dem Stromfehler und dem Fehlwinkel des Prüflings entsprechen, werden aus den Stellungen der Schleifdrahtabnehmer entnommen.

Eine Belastung des Prüflings durch die Meßeinrichtung ist im abgeglichenen Zustand kaum vorhanden. Eine Anpassung an die Klassengenauigkeit des Prüflings ist durch Anzapfungen an den Zusatzwicklungen des Differentialwandlers W_D möglich. Messungen bei ungleichen Übersetzungen erfolgen bei entsprechenden Windungszahlen der Normal- und der Prüflingswicklung auf W_D.

2.5 Differential-Null-Verfahren

Dieses von *Nölke* vorgeschlagene Prinzip zeigt Bild 5. Bei ihm sind wie beim Verfahren nach *Hohle* die Sekundärströme vom Normal und vom Prüfling in *einem* Stromkreis vereint.

Durch eine Fehlerstromwicklung W_F auf dem Normalwandler N wird dessen Sekundärstrom so verändert, daß ein im Differentialzweig liegendes Vibrations-

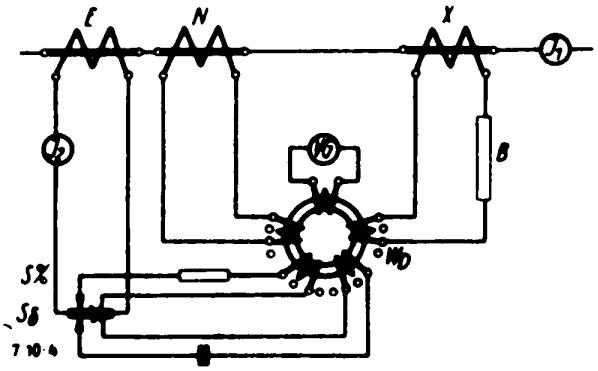


Bild 4. Stromwandlermessung mit Differentialringwandler

galvanometer *VG* die Gleichheit von Prüfling- und Normalwandler-Sekundärstrom durch Verschwinden seines Ausschlags anzeigt. Der Strom für die Erregung der Fehlerstromwicklung des Normalwandlers wird einem regelbaren Phasendreher *PhR* entnommen. Seine Größe und Richtung wird von zwei Zeigerinstrumenten

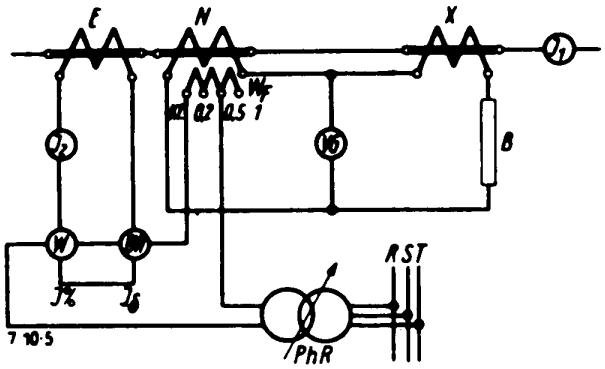


Bild 5. Stromwandlermessung im Differential-Null-Verfahren (Nölke)

angezeigt. Das Instrument $I_{\%}$ ist ein Wirkleistungsmesser, sein Ausschlag entspricht dem Stromfehler des Prüflings. Das Instrument I_δ zeigt die Blindkomponente des Stromes in der Fehlerstromwicklung, und sein Ausschlag entspricht dem Fehlwinkel. Die Erregung der beiden Zeigerinstrumente wird dem üblicherweise vorhandenen zweiten Kern E des Normalstromwandlers entnommen.

Eine Belastung des Prüflings durch die Meßeinrichtung tritt nicht ein, da im abgeglichenen Zustand an ihren Prüflingsklemmen keine Spannung vorhanden ist. Die Anpassung an die Fehlerklassen des Prüflings erfolgt durch Anzapfungen an

der Fehlerstromwicklung des Normalwandlers, der durch diese Wicklung allerdings eine Spezialausführung darstellt. Die Anzeige der Fehlergrößen durch Zeigerinstrumente macht dieses Verfahren für automatisch schreibende Stromwandler-Meßeinrichtungen besonders geeignet. Eine Messung bei ungleichen Übersetzungen ist nicht möglich.

2.6 *Differentialverfahren mit Kompensationsmeßzweig*

Bild 6 zeigt eine Schaltung, bei der genau wie bei *Hohle* (Abschn. 2.3) eine den Fehlergrößen des Prüflings entsprechende Spannung am Differentialwiderstand R_D auftritt. Sie wird in ihrer Größe und Richtung durch einen Meßzweig, wie er von der im Abschn. 2.2 beschriebenen Meßeinrichtung im Kompensationsverfahren be-

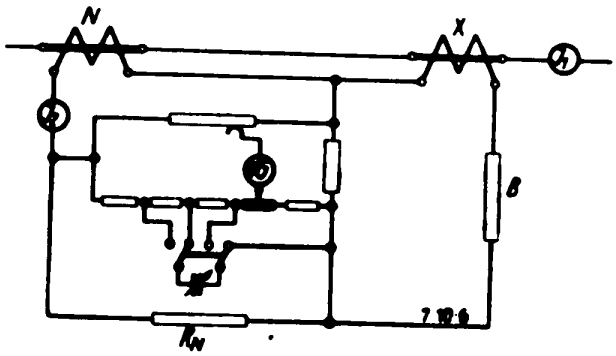


Bild 6. Stromwandlermessung im Differentialverfahren, Messung mit Kompensationsmeßzweig

reits bekannt ist, ausgemessen. Dazu ist auch noch der im Normalwandlerstromkreis liegende Widerstand R_N nötig.

Für diese Schaltung gilt das gleiche, das die Hohle-Brücke (s. Bild 3) kennzeichnet. Die Anpassung an die Fehlerklassen kann durch Änderung des Differentialwiderstandes R_D erfolgen. Die Belastung des Prüflings durch die Meßeinrichtung ist nur in geringem Maße durch die auftretende Bürdenverschiebung vorhanden. Die Messung bei ungleichen Übersetzungen ist nicht möglich.

2.7 *Zusammenfassender Vergleich*

Die Meßverfahren, die nach dem Kompensationsprinzip arbeiten, gestatten es ohne weiteres, auch ungleiche Übersetzungen, ja sogar ungleiche Sekundärnennströme, zu vergleichen. Sie bedeuten durch die notwendigen Normalwiderstände im Prüflingskreis für diesen eine, wenn auch kleine Bürde.

Die Differentialmeßverfahren ermöglichen es im allgemeinen nicht, Wandler mit abweichenden Übersetzungen zu messen. Sie bedeuten für den Prüfling meist eine nur geringe oder keine Bürde. Die Anpassung der Fehlerablesung an die Fehlerklassen ist fast stets vorhanden. Durch ihre Anzeige der Fehlergrößen an Schleifdrähten oder Zeigerinstrumenten sind sie gut geeignet für automatisch arbeitende Einrichtungen.

3. Stromwandlermessungen mit dem neuen Bereichswandler

Es lag nun nahe, nach einem Verfahren zu suchen, das die Vorzüge der beschrienen in sich vereinigt, ohne deren jeweilige Mängel mit zu übernehmen. Es sollte

also sowohl möglich sein, die Belastung des Wandlers durch die Meßeinrichtung klein zu halten als auch abweichende Übersetzungen zu messen und dann auch noch den Vorteil der Anpassung der Ablesung an die Klassengenauigkeit des Prüflings zu haben.

In der Entwicklungsstelle des Transformatorenwerks ist es nun gelungen, in einfacher Art die beiden um 90° gedrehten Spannungen, die nicht nur bei Stromwandlermessungen, sondern bei allen komplexen Brücken Anwendung finden können, in einem Bereichswandler zu erzeugen. Wie im folgenden noch beschrieben wird, kann dieser Wandler in mannigfacher Art den Forderungen der Meßtechnik angepaßt werden, da Umschaltungen auf seiner Primär- und Sekundärseite jede gewünschte Strom- und Spannungshöhe einzustellen gestatten.

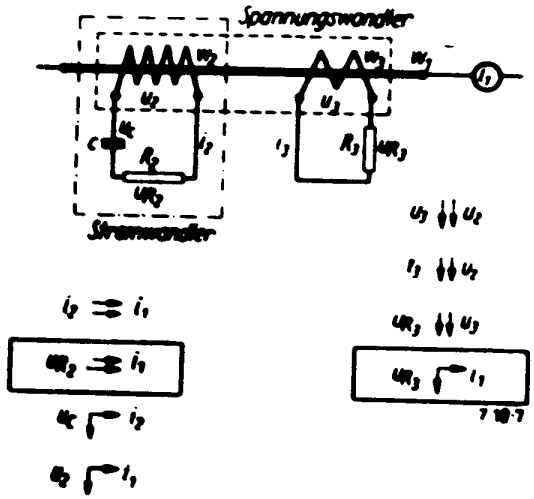


Bild 7. Bereichswandler, Vektorlage der Ströme und Spannungen

3.1 Bereichswandler

Bild 7 zeigt einen Wandler, der außer seiner Primärwicklung w_1 und seiner Sekundärwicklung w_2 noch eine dritte Wicklung w_3 besitzt. Die Wicklungen w_1 und w_2 kann man sich in ihrer Wirkung als normalen Stromwandler vorstellen. Infolge der Stromwandlereigenschaften dieser beiden Wicklungen zueinander wird der Strom i_2 seine Größe und Richtung nur unbedeutend ändern, wenn in seinen Stromkreis die Kapazität C eingeschaltet wird. Allerdings wird deren Spannung dem Strom i_2 um 90° nacheilen. Außerdem ist noch der Widerstand R_2 in diesem Stromkreis vorhanden. Werden nun der Widerstand R_2 und der Wicklungswiderstand in w_2 klein gegenüber $1/\omega C$ gehalten, so ist auch die Klemmenspannung u_2 an w_2 um 90° nacheilend.

Es ergeben sich also für diese beiden als Stromwandler wirkenden Wicklungen w_1 und w_2 folgende Vektorlagen der Ströme und Spannungen:

1. i_2 liegt phasengleich mit i_1,
2. u_{2R} phasengleich mit i_1,
3. u_{2C} ist um 90° gedreht gegen i_2 und damit
4. u_2 ebenfalls um 90° gedreht gegen i_1.

Die Wicklungen w_2 und w_3 können als Primär- und Sekundärwicklung eines *Spannungs*wandlers mit allen deren Eigenschaften betrachtet werden. Die Spannungen u_2 und u_3 liegen in gleicher Phase und ihre Höhe ist nur von dem Übersetzungsverhältnis zwischen den beiden Wicklungen abhängig. Um die Stromwandlereigenschaften der ersten beiden Wicklungen nicht zu verändern, darf der Wicklung w_3 keine große Leistung entnommen werden.

Es ergeben sich also für die Wicklungen w_2 und w_3, wenn die Belastung durch den Widerstand R_3 an w_3 klein bleibt, folgende Strom- und Spannungsverhältnisse:

1. u_2 ist phasengleich mit u_3;
2. i_3 in R_3 ist phasengleich mit u_3;
3. u_{R_3} ist ebenfalls phasengleich mit u_3; demnach ist
4. u_{R_3} um 90° gedreht gegen i_1.

Die 90°-Drehung läßt sich nur annähernd erreichen, da unvermeidliche Wicklungswiderstände und der Magnetisierungsbedarf des Eisenkernes dies verhindern.

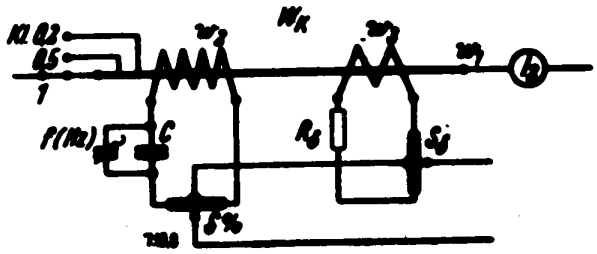


Bild 8. Bereichswandler mit Schleifdrähten zur Stromwandlermessung

Durch niedrige Wicklungswiderstände und durch Vormagnetisierung des Eisens mit dreifacher Netzfrequenz gelingt es, bis auf wenige Grad dem Ziel nahe zu kommen. Da die mit diesem Wandler betriebenen Meßeinrichtungen für Stromwandler, tgδ, Impedanz usw. zu Betriebsmessungen bestimmt sind, genügt der so aufgebaute Wandler den gestellten Forderungen.

In Bild 8 wird die Schaltung des beschriebenen Bereichswandlers zur Erzeugung zweier um 90° gegeneinander gedrehter Spannungen für Stromwandlermessungen gezeigt. In der Primärwicklung w_1 fließt der Sekundärstrom I_2 eines Normalstromwandlers. Dann ist nach dem vorher Gesagten die Spannung an dem Schleifdraht $S_\%$ in Phase mit dem Strom I_2. Die Spannung am Schleifdraht S_δ ist um 90° gedreht. Da die Spannung an S_δ von der Spannung an der Wicklung w_2 abhängt und diese sich bei veränderlicher Netzfrequenz infolge $1/\omega C$ auch ändert, ist C einstellbar. Dadurch ist es möglich, den Einfluß schwankender Frequenz auszuschalten.

Um die beiden Schleifdrahtspannungen den Klassengenauigkeiten der Stromwandler anpassen zu können, sind an der Primärwicklung w_1 Anzapfungen vorgesehen. Dadurch kann das Verhältnis der Spannungen an $S_\%$ und S_δ zum Strom I_2 in gewünschtem Sinne geändert werden. Die genaue Einstellung der Spannung an $S_\%$ erfolgt durch Windungsabgleich. Die Spannungshöhe an S_δ wird durch C und einen kleinen Vorwiderstand R_δ eingestellt. Da w_3 nur aus einer oder wenigen Windungen besteht, ist der Strom in diesem Kreis nur sehr gering und beeinflußt die 90°-Drehung nicht.

3.2 *Meßprinzip*

In Bild 9 wird nun die Schaltung für die Verwendung des Bereichswandlers zur Stromwandlermessung gezeigt.

Wie man sieht, arbeitet die Meßeinrichtung nach dem Kompensationsverfahren.

Die Sekundärströme des Normalwandlers N und des Prüflings X werden über die beiden Normalwiderstände R_N und R_X geleitet. Sie erzeugen dabei zwei Spannungen, deren Unterschied in Höhe und Vektorlage durch die Fehlergrößen des Prüflings verursacht ist. Dieser Unterschied wird durch die beiden Schleifdrahtspannungen an $S_{\%}$ und S_{δ} kompensiert.

Um an den Schleifdrähten sofort die Fehlergrößen des Prüflings ablesen zu können, entsprechen die Schleifdrahtspannungen für die einzelnen Klassen bestimmten Prozentsätzen der am Normalwiderstand R_N liegenden Spannung. Sie sind innerhalb der einzelnen Klassen in ihrer Höhe etwa gleich und werden durch

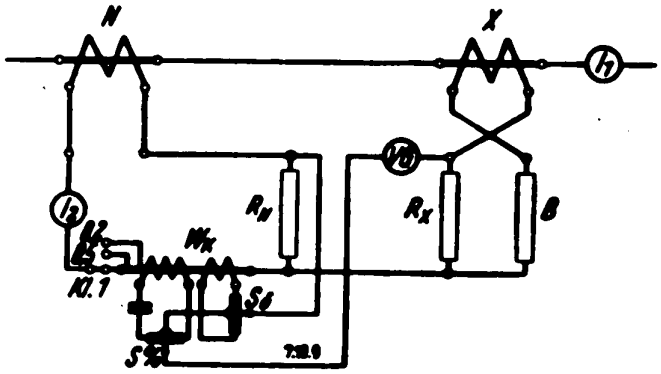


Bild 9. Stromwandlermessung im Kompensationsverfahren mit Bereichswandler (Prinzipschaltung)

die Fehlergrenzen nach VDE 0414 § 12 bestimmt. Da es sich um Betriebsmessungen handelt, ist Umschaltung für die Klassen 1, 0,5 und 0,2 vorgesehen.

Ehe ich zum Gesamtaufbau der von der Entwicklungsstelle des Transformatoren- und Röntgenwerkes Dresden vorgeschlagenen Stromwandlermeßschaltung übergehe, möchte ich erst noch einige Einzelheiten besprechen, die es ermöglichen, Vorzüge der zu Beginn beschriebenen Meßeinrichtungen in Anwendung zu bringen und weitere Verbesserungen vorzunehmen.

3.3 *Messung bei Bürde „Null VA"*

Die Kompensationsverfahren haben, wie bereits beschrieben, den Mangel, daß die Meßeinrichtung für den Prüfling eine Bürde darstellt. Um trotzdem im Kompensationsverfahren bei der Bürde „Null VA" messen zu können, ist die in Bild 10 angegebene Schaltung geeignet. Von der gesamten Meßeinrichtung sind nur die Teile gezeigt, die zur Besprechung wichtig sind.

Außer dem Normalwiderstand R_X ist im Prüflingskreis noch ein weiterer Widerstand R_G vorgesehen. Dieser wird über den Null-Bürdenwandler W_{B0} betrieben, dessen Strom dem Prüflings-Sekundärstrom I_{2X} in R_G entgegenfließt. Er ist so groß, daß der Spannungsabfall an R_G dem Spannungsabfall durch den Prüflings-

strom an R_X entgegengesetzt gleich ist. Dieser Zustand kann an dem eingezeichneten Vibrationsgalvanometer VG festgestellt werden. Dabei ist ein geringer Restbetrag ohne Bedeutung. Die grobe Anpassung des Gegenstromes in R_G an den Sekundärstrom des Prüflings erfolgt durch Primäranzapfungen des im Erregerkernkreis des Normalwandlers liegenden Null-Bürdenwandlers W_{B0}. Eine feinere Einstellung ist über Sekundäranzapfungen möglich.

An den Prüflingsklemmen k, l der Meßeinrichtung liegt also keine Spannung mehr, und die Meßeinrichtung bedeutet somit für den Prüfling keine Bürde.

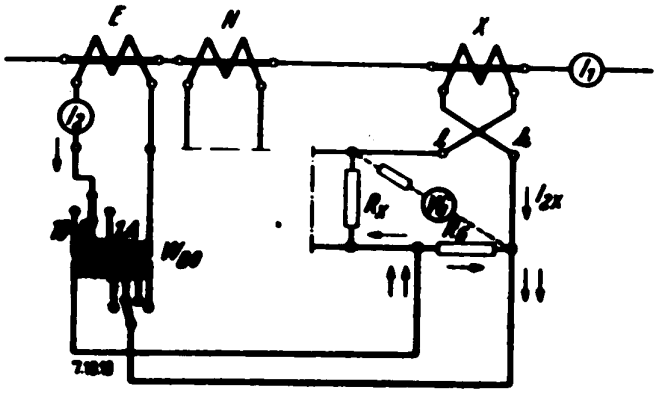


Bild 10. Messung eines Stromwandlers bei Bürde „Null-VA"

3.4 Kaskadenteiler für abweichende Übersetzungen

Im Anfang wurde bereits erwähnt, daß bei Verstellung des unteren Abnehmers der Teiler für die Messung abweichender Übersetzungen die Prüflingsseite nicht mehr niederohmig geerdet ist. Dies führt leicht zu Störungen der Messung, da induktive Erdströme zusätzliche Spannungen im Teiler erzeugen.

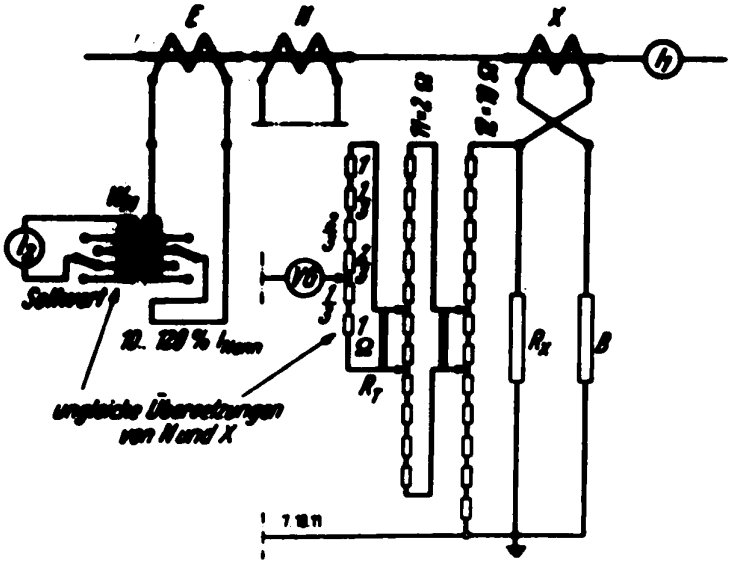


Bild 11. Kaskadenteiler für abweichende Übersetzungen und Meßpunkteinstellwandler

In unseren Meßeinrichtungen, nicht nur in der hier beschriebenen, wird deshalb ein an sich bekannter Kaskadenteiler in etwas geänderter Form angewandt. Die Prüflingsseite ist dabei stets fest geerdet, so daß Störungen hierdurch nicht auftreten können.

Dieser Teiler (Bild 11) besteht aus zwölf Widerständen zu je 10 Ω. Verstellbar zu jeweils zwei von ihnen liegen elf Widerstände zu je 2 Ω. Zu je zwei von diesen liegen verstellbar sechs Widerstände von insgesamt 4 Ω. Damit beträgt der Gesamtwiderstand des Teilers in jeder Stellung 110 Ω. An ihm können nicht nur jeder ganze Ohmwert, sondern auch gewisse Bruchteile abgegriffen werden. Damit lassen sich die Fehlergrößen der Stromwandler praktisch aller Übersetzungen durch entsprechende Teilerstellung ohne irgendwelche Umrechnung messen.

Beispielsweise ist für einen Prüfling 25/5 A der Normalwandler, der diese Übersetzung nicht enthält, auf die genormte Übersetzung 30/5 A zu schalten. Der Widerstandsteiler ist auf

$$r_T = 100 \cdot \frac{25}{30} = 83\ 1/3\ \Omega$$

einzustellen.

3.5 *Meßpunkteinstellwandler*

In dem gleichen Bild 11 ist noch der sogenannte Meßpunkteinstellwandler W_M dargestellt, der der Erleichterung beim Einstellen der Primärstromstärke dient.

Die üblichen Meßpunkte 10%, 20%, 50%, 80%, 100% und 120% des Primärnennstromes lassen sich besonders im unteren Bereich nur unsicher einstellen. Um eine sichere und bequemere Ablesung zu ermöglichen, liegt im Sekundärkreis des zweiten Kernes des Normalwandlers dieser Meßpunkteinstellwandler. Durch Primärwicklungsanzapfungen wird erreicht, daß das Instrument für I_2 *immer an der gleichen Stelle*, die in seinem günstigen oberen Bereich liegt, abgelesen wird.

Die Einstellung des Normalwandlerstromes bei ungleichen Übersetzungen läßt sich durch Anzapfungen an der Sekundärwicklung von W_M ebenfalls berücksichtigen, so daß auch in diesen Fällen das Anzeigeinstrument an der gleichen Stelle abgelesen wird.

3.6 *Gesamtmeßschaltung mit Bereichswandler*

Bild 12 zeigt die Gesamtschaltung der Meßeinrichtung mit Bereichswandler und den weiteren in den vorigen Abschnitten beschriebenen Einzelheiten: Bürde Null VA, Kaskadenteiler für abweichende Übersetzungen, Meßpunkteinstellwandler, auf deren Wirkungsweise nicht noch einmal eingegangen wird. Nur der Vorgang einer Stromwandlermessung mit dieser Einrichtung soll im folgenden kurz dargestellt werden.

Zuerst wird der Normalstromwandler auf die Stromstärke des Prüflings geschaltet, bei abweichenden Übersetzungen auf eine entsprechend höhere Primärstromstärke. Gleichzeitig wird am Meßpunkteinstellwandler W_M „% I_{nenn}" und wenn nötig das Verhältnis „I_{1X} zu I_{1N}" eingestellt. Der Normalwiderstand R_X wird auf den Sekundärstrom des Prüflings „1, 5 oder 10 A" gestellt und der Teiler r_T bei gleichen Übersetzungen am Normal und am Prüfling auf „100 Ω", sonst auf den passenden niedrigeren Wert. Die Stellung des Teilers r_T und das eingestellte Verhältnis I_{1X} zu I_{1N} am Meßpunkteinstellwandler müssen sich stets entsprechen.

Vor Beginn der Messung ist zum bei Schaltung des Vibrationsgalvanometers VG auf „$B0$" (Bürde Null VA) durch Regelung am Wandler W_{B0} „1, 5 oder 10 A" und „fein" die Spannung an k und l der Meßeinrichtung bei eingeschaltetem Primärstrom I_1 auf Null zu kompensieren, was durch Minimumausschlag des VG angezeigt wird.

Danach wird das VG auf „M" (Messen) geschaltet, die gewünschte Klassengenauigkeit „Kl. 1, 05, oder 0,2" am Bereichswandler W_K eingestellt und am Meßpunkteinstellwandler W_M der Meßpunkt „10 ··· 120% I_{nenn}" gewählt. Die Einstellung der herrschenden Frequenz „Hz" geschieht am Bereichswandler W_K.

Die Fehler des Prüflings werden nun in bekannter Art an den Schleifdrähten „$F_\%$" und „F_δ" durch Nullabgleich kompensiert.

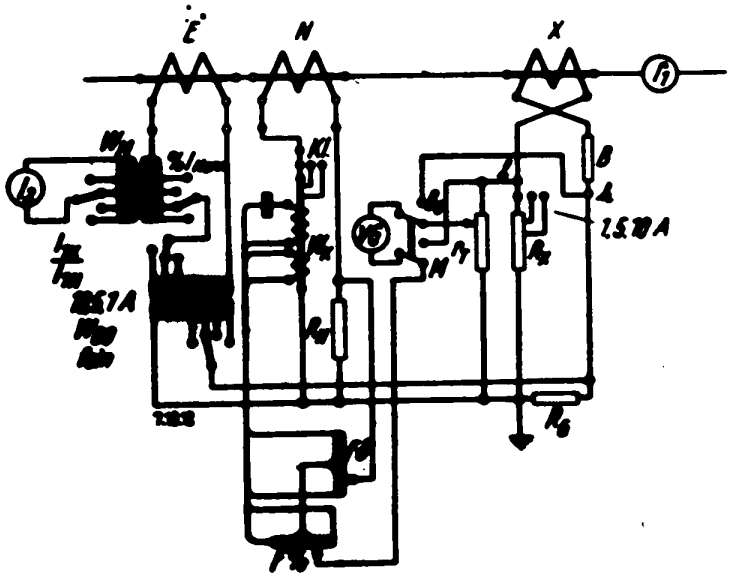


Bild 12. Stromwandlermeßeinrichtung mit Bereichswandler

3.7 Zusammenfassung

Die Stromwandlermeßeinrichtung gestattet demnach:

- die Messung von Wandlern jeder Übersetzung,
- die Messung von der Bürde „Null VA" ab,
- die Anpassung der Meßgenauigkeit an die Fehlergrößen, und
- die genaueste Einstellung des Primärstromes.

Damit vereinigt diese Meßeinrichtung alle Vorzüge der nach dem Kompensations- und dem Differentialprinzip arbeitenden Verfahren.

Die Einstellung der Fehlergrößen an Schleifdrähten erleichtert den Bau einer die Fehlerkurven schreibenden automatischen Anlage.

4. Spannungswandlermessung mit Bereichswandler

Nach der Beschreibung der Stromwandlermessung soll noch eine weitere Anwendungsmöglichkeit des Bereichswandlers kurz gestreift werden.

Bild 13 zeigt die Anwendung des Bereichswandlers zur Spannungswandlermessung. Der Bereichswandler W_K wird dabei über geeignete Vorwiderstände an die Sekundärseite des Normalspannungswandlers gelegt.

Im übrigen entspricht die Meßschaltung einer bekannten Ausführung.

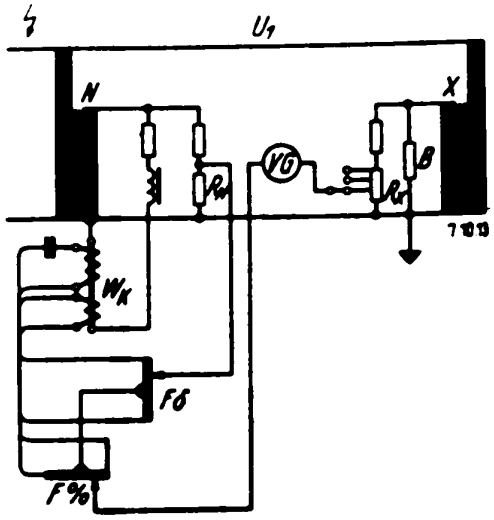


Bild 13. Spannungswandlermessung mit Bereichswandler

5. Verlustfaktormessung an Transformatoren mit Bereichswandler

Die Erhöhung der Übertragungsspannungen macht es immer dringender notwendig, die Isolation jedes einzelnen Transformators im Prüffeld auf seinen Verlustfaktor bei Nenn- und Prüfspannung zu untersuchen. Bekanntlich sind derartige Messungen in den Prüffeldern sehr zeitraubend, so daß das Bedürfnis an automatisch schreibenden tgδ-Meßeinrichtungen groß ist. Eine solche z. Z. noch in Entwicklung stehende automatisch schreibende Einrichtung soll es den Prüffeldern ermöglichen, laufende Überwachung des Verlustfaktors durchzuführen.

Die Ablesung ist den Erfordernissen angepaßt und für die Bereiche tgδ = 10^{-1}, 10^{-2} und 10^{-3} ausgelegt.

Bild 14 zeigt die Prinzipschaltung der tgδ-Messung mit dem Bereichswandler. Dieser entspricht in seinem Aufbau und seiner Wirkungsweise ganz dem bisher beschriebenen, nur die Dimensionierung seiner Wicklungen ist dem Zweck entsprechend geändert. Die gesamte Schaltung arbeitet ebenfalls im Kompensationsverfahren. Man erkennt auf dem Bild sogleich die Ähnlichkeit mit der vorher beschriebenen Stromwandlermessung. Jedoch zeigen diesmal die beiden Schleifdrähte den Verlustfaktor tgδ und die Kapazitätsänderung ΔC des Prüflings. Die Berücksichtigung der Frequenz erfolgt in bereits beschriebener Art. Für die tgδ-Bereiche sind umschaltbare Vorwiderstände vorgesehen.

Der Strom des Normalkondensators C_N durchfließt den Bereichswandler W_K und den Normalwiderstand R_N. Der Strom des Prüflings C_X mit seinem Verlustwiderstand R_{VX} durchfließt den einstellbaren Normalwiderstand R_X. Bei verlustfreiem Prüfling läßt sich durch Einstellen von R_X die Spannung an ihm gleich der an R_N machen. In jedem anderen Fall verursacht der Verlustwiderstand des

Prüflings einen Phasenunterschied beider Spannungen, der an dem Schleifdraht tgδ kompensiert und seinen Betrag nach gemessen werden kann. Die Spannung an diesem Schleifdraht ist gegen den Strom des Normalkondensators C_N um 90° gedreht.

Aus den Werten C_N, R_N und R_X läßt sich die Prüflingskapazität zu

$$C_X = C_N \cdot \frac{R_N}{R_X}$$

errechnen.

Aus dem Verhältnis der Spannungen an R_N und dem Schleifdraht tgδ ergibt sich der Verlustfaktor.

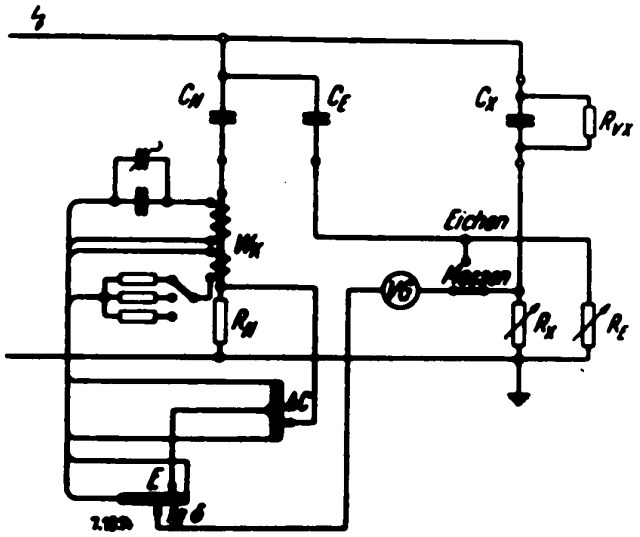


Bild 14. Verlustfaktormessung mit Bereichswandler

Änderung der Kapazität des Prüflings während der Prüfung wird am Schleifdraht ΔC abgeglichen und gemessen.

Da im Stromkreis des Normalkondensators C_N die unvermeidlichen Wicklungswiderstände und die Magnetisierungsverluste des Bereichswandlers liegen, ist auch C_N mit einem geringen Fehlwinkel behaftet. Obgleich dieser Fehler klein ist und bei höheren Spannungen immer weniger in Erscheinung tritt, ist Vorsorge getroffen, ihn am Schleifdraht „tgδ" zu kompensieren. Zu diesem Zweck besitzt dieser Schleifdraht noch den Schleifer E, mit dem die „Null"-Stellung genau eingeregelt werden kann. Dazu wird der bei den Preßgaskondensatoren des Transformatoren- und Röntgenwerkes Dresden vorhandene zweite Belag C_E benutzt. Er wird bei der Schalterstellung des Vibrationsgalvanometers VC auf „Eichen" als Prüfling gemessen. Da er zuverlässig verlustfrei ist, wird der tgδ-Schleifer auf Null gestellt und mit dem Schleifer E kompensiert. Dieser Schleifer E wird nun in seiner Stellung belassen, und die Messung des Prüflings kann nach Umschalten des VC auf „Messen" ohne Fehler vorgenommen werden. Die jederzeit auch zwischen den Messungen wiederholbare Eichung gibt einen erhöhten Grad der Sicherheit.

Die Teile der Weiterentwicklung zur automatisch schreibenden Einrichtung sind aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen.

Der Aufbau der gesamten Anlage kann bei Verwendung des Bereichswandlers den Erfordernissen des Prüffeldbetriebes entsprechend robust gestaltet werden und bietet doch durch Umschaltung der tgδ-Bereiche eine hohe Genauigkeit. 25X1

6. Kurzschlußimpedanzmessung an Transformatoren mit Bereichswandler

Von den weiteren Möglichkeiten der Anwendung des Bereichswandlers für komplexe Messungen soll zum Schluß nur noch eine Impedanzmessung beschrieben werden.

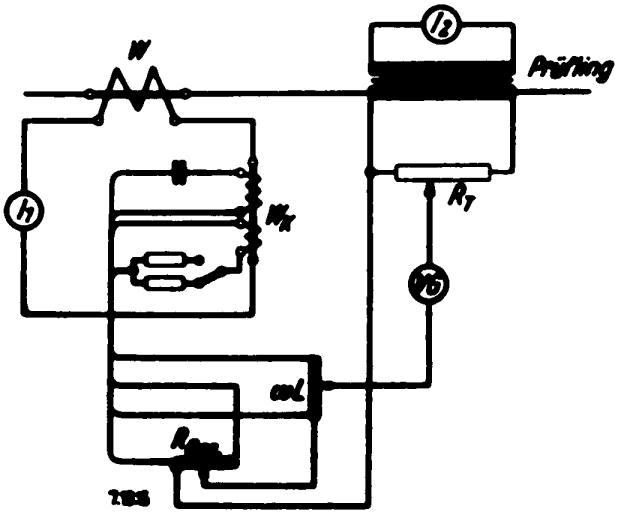


Bild 15. Kurzschlußimpedanzmessung eines Transformators mit Bereichswandler

Bild 15 zeigt die Prinzipschaltung. Im Stromkreis des Prüflings P liegt zur Messung des primären Kurzschlußstromes ein Stromwandler W, in dessen Sekundärseite außer dem Meßinstrument noch der Bereichswandler W_K eingeschleift ist. Ein Teil der am Spannungsteiler R_T liegenden Primärspannung des Prüflings wird an den beiden Schleifdrähten R_{ges} und ωL kompensiert. Die ohmschen und induktiven Anteile können so gemessen werden. Dabei ist zu zu bedenken, daß die Widerstände der Sekundärseite des Prüflings sich nach der Primärseite übersetzen und daß auch die Kernverluste mit gemessen werden.

7. Zusammenfassung

Die Anwendungsbeispiele des Bereichswandlers zeigen, daß mit ihm ein Gerät geschaffen wurde, das universell verwendbar ist und das sich mit seinen Wicklungen weitgehend den Forderungen der Messung anpassen läßt. Durch Einschalten verschiedener Meßbereiche kann stets mit großer Genauigkeit abgelesen werden. Seine Anwendungsmöglichkeit ist durchaus noch nicht erschöpft. Er wird uns in der Zukunft wohl noch in vielen Fällen Messungen erleichtern helfen.

25X1

10. Kabel und Leitungen[1])

10.1 Aluminiummantelkabel

Aluminum Covered Cables

Dir. *Pohler*, Berlin

Werkdirektor *Pohler* gab einen umfassenden Überblick über den Stand der Technik zur Herstellung von Aluminiummänteln. Die Weltknappheit an Blei führte einesteils zur Entwicklung von Kunststoffkabeln, anderenteils zum Ersatz des Bleis durch Aluminium. Beide Wege sind mit gutem Erfolg beschritten worden. Im VEB Kabelwerk Oberspree sind insgesamt schon etwa 3000 km an Kabeln mit Aluminiummänteln hergestellt worden, und zwar Starkstromkabel, [illegible] und Hochfrequenzkabel. Die Mäntel dieser Kabel wurden ausschließlich durch das hydraulische Preßverfahren (wie bei der Bleimantelfertigung) hergestellt. Überdies höhere Preßtemperaturen und höhere Preßdrücke [illegible] der unterschiedlichen Eigenschaften des Aluminiums und des Bleis [illegible] Die verarbeitungstechnischen Vorteile von Reinst-Aluminium [illegible] Aluminium (99,5) wurden ausführlich dargelegt.

[illegible] Diskussion wurden die Fragen nach der Lieferbarkeit [illegible] Starkstromkabeln größeren Durchmessers besprochen, [illegible] Korrosionsschutzes und der Erdung des Mantels.

10.2 Zur Physik PVC-isolierter Starkstromkabel

Dr. *Birnstiehler*, Nürnberg

Aus den an Hand tabellarischer Übersichten erläuterten Materialeigenschaften der für Starkstromkabel in Frage kommenden thermoplastischen Kunststoffe wurden die Verwendungsvorteile und -grenzen von PVC-isolierten Kabeln aufgezeigt. In der Diskussion wurde die Gewichtsfrage bei Schacht- und Gebirgskabeln herausgestellt und die Einsatzmöglichkeit im Bergbau und explosionsgefährdeten Räumen erörtert. Das Problem der thermischen Kurzschlußfestigkeit wurde kritisch beleuchtet.

10.3 Über den Stand der Fertigung von Lackdrähten

Ing. *Hören*, Berlin

Es wurde eine Übersicht über die Herstellungsmethoden und die zur Verwendung kommenden Lackmaterialien gegeben. In der Diskussion wurde die Frage nach der Tropenfestigkeit der Lackdrähte behandelt.

[1]) Die Vorträge werden in Zeitschriften veröffentlicht.

11,398

10.4 Polyamide in der Kabel-, Leitungs- und Drahttechnik

Dr.-Ing. *Schröder*, Berlin

An Hand interessanter Lichtbilder wurden die Eigenschaften der Poly[illegible] erläutert und aus diesen die Anwendungsmöglichkeiten von Polyamiden [illegible] Kabel- und Drahttechnik abgeleitet. In der Diskussion wurden die Fra[illegible] Temperaturbeständigkeit, des Fremdstoffeinflusses und der Austauschbark[illegible] andere Isolierstoffe durchgesprochen.

11,399

10.5 Schnelldiffusionsmessungen

Dr. *Dinse*, Berlin

Die Vorteile einer vom VEB Kabelwerk Oberspree weiterentwi[illegible] metrischen Methode zur Messung der Diffusionskonstanten von K[illegible] gegenüber der üblichen gravimetrischen Methode wurden an Hand [illegible] vollen Lichtbildern dargelegt. In der Diskussion wurde erörtert, [illegible] Ausmaß diese verbesserte Methode auch zur Feststellung der Fu[illegible] nischen Porzellanen angewendet werden kann.

11.3 Technologie der elektroerosiven Bearbeitung von Hartmetallziehsteinen

Ing. *R. Zorn*, Berlin

1. Allgemeines

Schon heute wird auf der ganzen Welt die Elektroerosion als ein neues, [illegible] eigenen Gesetzen folgendes Bearbeitungsverfahren angewandt.

Die mit den bekannten mechanischen Verfahren nicht mehr bearbeitbaren, [illegible] harten Stähle, und vor allem die Hartmetalle, haben nach anderen, [illegible] licheren Bearbeitungsmöglichkeiten suchen lassen. Der Engpaß an [illegible] letztem Werkstoff, mit dem diese harten Stoffe noch gespannt werden [illegible] eine weitere Triebfeder, die sowohl in der Sowjetunion als auch in den [illegible] Ländern dem Elektroerosions-Verfahren solchen Auftrieb gab, daß [illegible] Werkzeugbau und die hartmetallbearbeitende Industrie eine [illegible] noch denkbar sind.

Hinweise in unserer Fachpresse und Übersetzung von [illegible] nügen nicht, den Fertigungsstand des Auslandes zu erreichen. [illegible] einem möglichst großen Kreis von Fachleuten Maschinen in die [illegible] damit diese selbst die Eigenarten des Verfahrens kennenlernen und [illegible] Anwendung in unserer Industrie auf breitester Basis ermöglicht wird.

Von den vielen elektroerosiven Bearbeitungsmethoden soll hier nur das [illegible] erosive Verfahren und von den noch nicht übersehbaren Anwendungsmöglichkeiten nur eine betrachtet werden:

„Die Herstellung von Hartmetallziehsteinen."

2. Verfahrenstechnik

2.1 *Prinzipschaltbild*

Wer das Prinzipschaltbild des funkenerosiven Verfahrens betrachtet, ist über den einfachen Aufbau überrascht (Bild 1). Um eine Abtragung von Metall auf elektroerosivem Wege zu erreichen, braucht man

eine Stromquelle,
einen Belastungswiderstand und
einen Kondensator als Aufladungskreis, der über das Werkstück und die Werkzeugelektrode entladen wird.

Das Werkstück schaltet man als Anode, die Elektrode als Katode und legt beides in ein Dielektrikum, das meist aus Öl oder Petroleum besteht.

Nähert man die Elektrode dem Werkstück so weit, daß ein Funke überspringt, tritt eine Materialabtragung sowohl am Werkstück als auch an der Elektrode ein. Läßt man jetzt die Elektrode durch eine mit Netzfrequenz gespeiste Spule schwin-

gen, haben wir das prinzipielle Verfahren, wie es auch bei den Ausfunkgeräten angewandt wird.

Der Elektrodenvorschub erfolgt hierbei meist von Hand. Um jedoch eine wirtschaftliche Bearbeitung zu erreichen, ist es notwendig, einen automatischen Elektrodenvorschub vorzusehen, der die Elektrode immer im Abstande des Funkenüberschlagpunktes hält. Erst dadurch sind Leistungsvergleiche bei verschiedenen elektrischen Werten möglich und eine laufende Bedienung der Maschine nicht mehr notwendig.

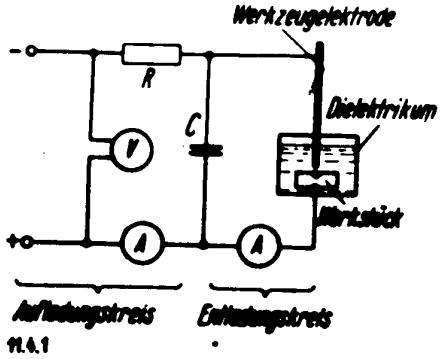


Bild 1. Prinzipschaltbild des Funkenerosions-Verfahrens

2.2 Materialabtragung und Oberflächengüte

Am verständlichsten wird die Eigenart des Verfahrens, wenn man es mit den bekannten mechanischen Verfahren vergleicht.

Ebenso wie an der Drehmaschine geschruppt, geschlichtet und feingeschlichtet werden kann, je nachdem ein großer oder kleiner Spanquerschnitt, eine große oder kleine Schnittgeschwindigkeit eingestellt wird, erreicht man beim funkenerosiven Verfahren verschiedene Genauigkeiten und Oberflächengüten. Was man beim Drehen mechanisch einstellen bzw. verändern kann, geschieht hier durch Einstellen bzw. Ändern der elektrischen Werte: der Spannung, des Stromes und der Kapazität.

Es gelten hier die gleichen Zusammenhänge wie bei der mechanischen Bearbeitung von Metallen:

Schruppen:	*Schlichten:*
kurze Bearbeitungszeiten	lange Bearbeitungszeiten
große Toleranzen	kleine Toleranzen
große Oberflächenrauhigkeiten	kleine Oberflächenrauhigkeiten.

Ein Beispiel veranschaulicht am deutlichsten die Zusammenhänge zwischen Werkstück- und Elektrodenabtragung und der Oberflächengüte (Bild 2).

Es sind hier Hartmetallplättchen von 4 mm Dicke mit 4 mm Kupferelektroden bearbeitet worden. Der Kurzschlußstrom betrug bei allen Versuchen 1 A, der Elektrodenvorschub 4 mm. Es wurde die Entladungskapazität von 0,05 bis 1000 μF verändert.

Wir sehen, daß bei kleinen Kapazitäten eine große Werkstückabtragung und eine kleine Elektrodenabtragung erfolgt. Die Oberfläche ist sehr sauber, die Bearbeitungszeit jedoch sehr lang.

Das Gegenteil tritt bei hohen Entladungskapazitäten ein. Der wirtschaftliche Arbeitspunkt richtet sich nach dem Verwendungszweck des Werkstücks. In der Regel dürfte er dort liegen, wo die Werkstückabtragung gleich der Elektrodenabtragung ist (Bild 3).

Dieser Arbeitspunkt verschiebt sich bei Veränderung des Kurzschlußstroms unter Verkürzung der Bearbeitungszeit auf Kosten der Oberflächengüte und Arbeits-

Bild 2. Abtragungsleistung und Oberflächenrauhigkeit bei Kondensatorgrößen von 0,05 bis 1000 µF

toleranz. Für die Grundlagenforschung gilt es jetzt, diese hier kurz skizzierten Zusammenhänge mit wissenschaftlicher Exaktheit für alle elektrischen Bedingungen zu ermitteln und in Kurvenscharen aufzustellen. Dann erst ist es möglich,

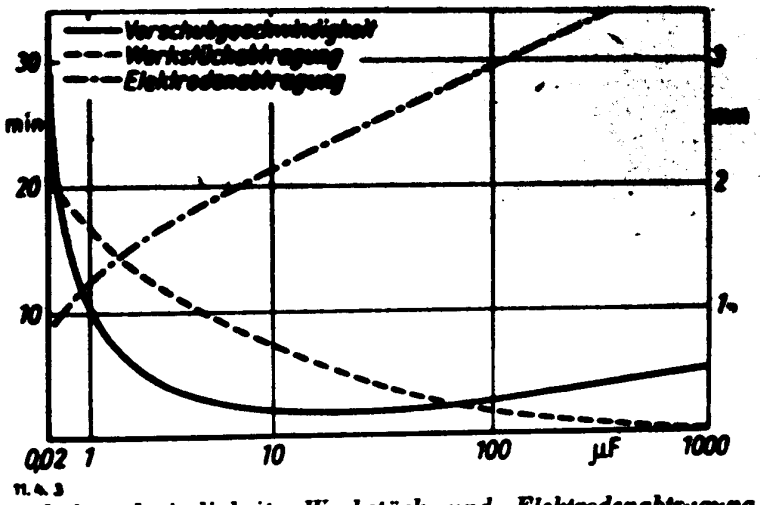


Bild 3. Vorschubgeschwindigkeit, Werkstück und Elektrodenabtragung bei einem Kurzschlußstrom von 1 A (Grafik)

in den Betrieben von dem Zustand des Probierens zu vorher festzulegenden wirtschaftlichen Arbeitsbedingungen zu kommen.

Ein weiterer Punkt für ein einwandfreies Arbeiten ist die Beschaffenheit und die Filtrierung des Dielektrikums, der gleichfalls mit wissenschaftlichen Methoden gelöst werden muß.

2.3 *Elektroerosive Bearbeitungsmaschinen*

Die soeben geschilderten Zusammenhänge sind in ihren großen Umrissen durch einfache Werkstattversuche festgestellt worden und bildeten die Grundlagen zum Bau einer elektro-erosiven Fabrikationsmaschine (Bild 4). Diese seit fast einem

Jahr in Betrieb befindliche Maschine zeigt, daß unsere jetzigen Erfahrungen ausreichen, um das funkenerosive Bearbeitungsverfahren in größerem Maßstabe einzusetzen.

Drei elektrisch unabhängige Arbeitskreise sind aus bedienungstechnischen Gründen in einem Rahmengestell vereinigt worden. Jedes Aggregat ist mit veränderlichen Belastungswiderständen und regelbarer Kapazität ausgerüstet, die es gestatten, die elektrischen Bedingungen zu verändern.

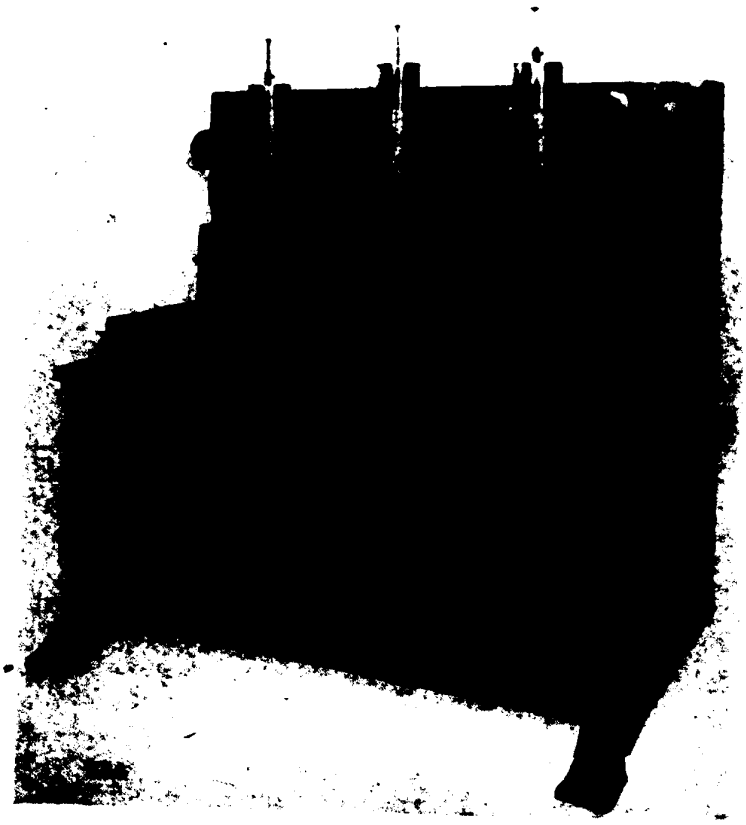


Bild 4. Dreispindlige Produktionsmaschine EB 2

Der Flüssigkeitsbehälter wird mechanisch auf- und abgefahren, so daß das Spannen des Werkstücks außerhalb des Dielektrikums erfolgt. Der Werkzeugelektrodenvorschub erfolgt automatisch und kann über einen verstellbaren Anschlag begrenzt werden.

Um jedoch die technologischen Bedingungen genauer kennenzulernen, insbesondere die Abtragungsmenge bei größeren Strömen, wurde innerhalb von 5 Monaten eine Versuchsmaschine entwickelt und gebaut, die eine Gesamtleistung von 4,5 kW abgibt (Bild 5). Es ist hier bewußt auf eine Tischverstellung verzichtet worden. Die gesamte Verstellmöglichkeit wurde in die Arbeitsspindel gelegt, um Fehlerquellen zwischen Elektrode und Werkstück beim Verstellen von Tisch und Werkstück während des Arbeitsgangs von vornherein auszuschalten.

Außerdem ist die Spindel drehbar ausgeführt, um genaue Rundbohrungen herstellen zu können. Bei profilierten Einarbeitungen wird sie festgestellt.

Eine Kühlmittelpumpe sorgt für den ständigen Flüssigkeitsumlauf, wobei das Dielektrikum über einen Dreiwegehahn sowohl durch die Spindel als auch von außen an den Arbeitspunkt geleitet werden kann. Ein Schwimmerkontakt sorgt dafür, daß der Arbeitsstrom nur fließen kann, wenn der Flüssigkeitsbehälter hoch gefahren ist und das Dielektrikum den Funkenüberschlagspunkt genügend hoch bedeckt.

Bild 5. Funkenerosive Bearbeitungsmaschine EB 3

Der Stand der Arbeitsspindel ist von einem auf der Frontplatte angebrachten Anzeigegerät ablesbar, so daß jederzeit die noch mögliche Spindelverstellung ersichtlich ist. Die Grobverstellung erfolgt von Hand.

Die automatische Vorschubregelung wird über eine Reibkupplung durch seitliche Verschiebung des Handrades eingerückt. Die Abschaltung der Automatik erfolgt entweder mechanisch durch Ausrückung des Handrades oder elektrisch durch ein Schaltschütz. Der Schaltimpuls wird durch den einstellbaren Tiefenbegrenzer am Anzeigegerät oder durch den Endanschlag gegeben.

2.4 *Anwendungsmöglichkeiten der funkenerosiven Metallbearbeitung*

Von den Möglichkeiten der funkenerosiven Metallbearbeitung seien als wichtigste erwähnt:

a) die Herstellung von Hartmetallziehsteinen jeder Profilierung, von Formdrehmeißeln, Gewindestrahlern, Gewindebohrern, Preßmatrizen, Schnitt- und Stanzwerkzeugen aus Hartmetall, naturhartem und gehärtetem Stahl,
b) die Nacharbeit dieser Teile zur Instandhaltung und Reparatur besonders in den Werkzeugmachereien,
c) das Einarbeiten von Bohrungen und Durchbrüchen in Einspritzdüsen, Zerstäuber, Filter usw., die in Durchmesser und Form nach den bekannten mechanischen Verfahren nur unter großen Schwierigkeiten durchzuführen sind,
d) das Ausfunken von abgebrochenen Werkzeugen in wertvollen Werkstücken, die überhaupt nicht mehr oder nur durch großen Arbeitsaufwand wieder verwendbar sind.

Das Ausfunken auf elektro-erosiver Basis ist in der DDR am weitesten verbreitet, während die anderen erwähnten Möglichkeiten noch im Versuchsstadium stecken. Lediglich die Herstellung von Hartmetallziehsteinen beginnt sich mehr und mehr des funken-erosiven Verfahrens zu bedienen.

3. Technologie

Der technologische Arbeitsablauf soll zeigen, in welcher Reihenfolge und mit welchen Betriebsmitteln das gewünschte Werkstück wirtschaftlich hergestellt werden kann. Er gibt uns die elektrischen Werte und die Form der Elektroden für jeden Arbeitsgang an.

3.1 *Technologische Kennwerte des funkenerosiven Verfahrens*

Die wichtigsten technologischen Kennwerte des funkenerosiven Verfahrens sind

die Abtragungsleistung,
die Oberflächengüte und
die Bearbeitungsgenauigkeit.

Diese werden von folgenden Bedingungen beeinflußt:

a) elektrische Betriebswerte (Spannung, Strom, Kapazität)
b) Werkstoff des Werkstücks
c) Form und Abmessung des Werkstücks
d) Herstellungsgenauigkeit der Werkzeugelektrode
e) Steifigkeit der Werkzeugelektrode
f) Art des Werkzeug-Elektrodenvorschubs
g) Eigenschaften der Arbeitsflüssigkeit
h) Zutrittsmöglichkeit der Arbeitsflüssigkeit zum Arbeitspunkt.

Die Abtragungsleistung wird durch die Änderung der elektrischen Werte gesteuert.

Hierbei gilt beim Schruppen:

große Stromstärke und große Kapazität, wobei unter groß über 6 bis 20 A Kurzschlußstrom und mehr als 40 bis 200 μF Kondensatorkapazität verstanden wird.

Es gilt beim Schlichten:

kleine Stromstärke und kleine Kapazität, wobei bis zu 0,1 A und 0,05 μF bei sehr feiner Oberflächengüte gegangen wird.

Diese Werte sind abhängig von dem Querschnitt der zu bearbeitenden Fläche.

Die in der Literatur genannte stärkste Hartmetallabtragung bei Verwendung von Graugußelektroden konnte bei dem uns zur Verfügung stehenden Grauguß nicht bestätigt werden. Die Oberflächengüte ist in weiten Grenzen ebenfalls von den elektrischen Werten beeinflußbar. Je kleiner man die Kapazität wählt, um so sauberer wird die Oberfläche.

Bei der Herstellung von Hartmetallziehsteinen hat es sich als wirtschaftlich erwiesen, bis 0,2 mm vor Fertigmaß funken-erosiv abzutragen und dann mechanisch zu polieren. Die Oberfläche ist schneller zu polieren und weist mehr tragende Punkte auf als bei einem mechanisch bearbeiteten Werkstück.

Bild 6. Formverzerrung durch schlechtes Wegspülen des Bohrkleins

Bearbeitungsriefen und Welligkeit, wie sie beim Arbeiten mit Borkarbid auftreten, entfallen hier vollständig.

Da die Abtragung immer dort erfolgt, wo sich Werkstück und Werkzeugelektrode am nächsten stehen, ist es klar, daß die Herstellungsgenauigkeit der Elektrode entscheidend für die Bearbeitungsgenauigkeit am Werkstück ist. Jede Erhöhung an der Werkzeugelektrode ergibt eine Abtragung und damit eine Ungenauigkeit am Werkstück.

Bei Einarbeitungen mit engen Toleranzen ist die Einhaltung der Spannung an den Elektroden sehr wichtig. Schon bei geringer Netzschwankung ändert sich der Elektrodenabstand, bei dem der Funkenüberschlag erfolgt. Die dadurch veränderte Energie führt zu ungleicher Materialabtragung. Man setzt deshalb für diese Arbeiten Spannungskonstanthalter ein.

Bei der Gestaltung der Werkzeugelektrode ist darauf zu achten, daß ein guter Zutritt der Arbeitsflüssigkeit zum Arbeitspunkt möglich ist; sonst bilden sich Ansammlungen abgetragenen Materials und Zersetzungsprodukte der Flüssigkeit.

Diese der Werkzeugelektrode anhaftende, halbleitende, schlackenartige Masse verursacht Vertiefungen und Verzerrungen der gewünschten Form im Werkstück (Bild 6).

3.2 *Werkzeugelektrode*

Die Abtragsleistung und die Oberflächengüte eines funken-erosiv bearbeiteten Werkstücks ist in starkem Maße von dem Werkstoff, der Form und der Herstellgenauigkeit der Werkzeugelektrode abhängig.

Als Elektrodenmaterial wird Kupfer und Messing in handelsüblicher Qualität verwendet. Anzustreben ist ein sehr feinkörniges Materialgefüge, da hierbei das Herausreißen von Materialteilchen beim Funkenüberschlag am geringsten ist.

Aus Kupferpulver bestehende, bei 300 bis 400° C gesinterte Werkzeugelektroden haben in bezug auf Genauigkeit und Haltbarkeit gute Resultate gezeigt.

Die besten Ergebnisse bringen Elektroden aus schwer schmelzenden Metallen, wie Wolfram oder Molybdän, die jedoch ihres hohen Preises wegen nur bei sehr kleinen Querschnitten und schwierigen Formen verwendet werden.

Wenn irgend möglich, sind die Elektroden hohl zu gestalten. Dadurch ist

1. weniger Material abzutragen und
2. kann die Arbeitsflüssigkeit durch die Werkzeugelektrode gedrückt werden.

Dies ermöglicht eine gute Entfernung der abgetragenen Materialteilchen.

Die größte Schwierigkeit besteht z. Z. noch in der Herstellung der Formelektroden. Hier dürfte ein Stempelhobler mit Erfolg eingesetzt werden können. Bei größeren Stückzahlen werden Hämmermaschinen die gewünschte Form der Elektroden einschlagen.

3.3 *Arbeitsflüssigkeit*

Als Arbeitsflüssigkeit wird Petroleum oder Transformatorenöl, rein und in Mischungen, verwendet. Je feiner die gewünschte Arbeitstoleranz am Werkstück ist und je tiefer die Abtragung erfolgen soll, um so dünnflüssiger muß das Dielektrikum sein.

Wie bereits erwähnt, ruft die Funkenenergie neben der Materialabtragung an den Elektroden auch eine Zersetzung der Arbeitsflüssigkeit hervor. Diese Zersetzungsprodukte enthalten Kohlensäure, die in Gasform aus der Flüssigkeit austritt und gesundheitsschädlich ist.

Die abgetragenen Materialteilchen und diese Zersetzungsprodukte des Öls reduzieren die Abtragungsleistung wesentlich, so daß für eine gute Filtrierung des Dielektrikums gesorgt werden muß. Die Folge der Verunreinigungen sind auch Aufkohlungsschichten, die sich auf den Elektroden bilden. Diese Erscheinung ist bei Verwendung von Wasser nicht zu beobachten, jedoch wird bei Gleichstrom die Metallabtragung durch die Elektrolyse des Wassers geringer. Bei Wechselstrom ist die Abtragungsleistung ebenso groß wie bei Verwendung eines Dielektrikums, jedoch ist die Werkzeugelektrodenabtragung größer.

Die bearbeitete Oberfläche ist beim Abtragen unter Wasser wesentlich rauher. Dazu kommt, neben der Rostgefahr an der Maschine, die Schwierigkeit der Isolierung bei Verwendung von Spannungen über 40 V.

3.4 *Bisherige Arbeitsweise bei der Herstellung eines Hartmetallziehsteines*

Der Ziehstein hat die Aufgabe, das Material spanlos zu formen. Die Formung findet im Ziehtrichter statt. Das parallele Führungsteil hat großen Einfluß auf die Standzeit des Ziehsteines (Bild 7).

Bei der bisher üblichen Arbeitsweise werden Rohlinge verwendet, bei denen die Form des einzuarbeitenden Ziehholes vorgepreßt ist.

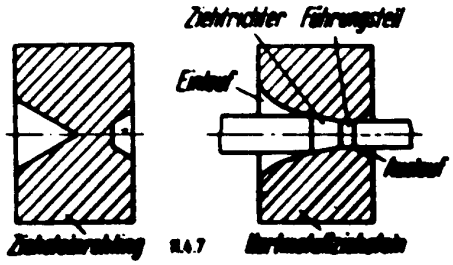


Bild 7. Ziehholform eines Hartmetallziehsteines

Die Rohlinge für Ziehsteine unter 3 mm Fertigbohrung sind nur im Ein- und Auslauf vorgearbeitet, da die hierfür notwendigen kleinen Öffnungen im Rohling serienmäßig nicht hergestellt werden.

Um die Lagerbestände klein zu halten, werden die Rohlinge in bestimmten Durchmessergruppen hergestellt und auf das gewünschte Maß nachgearbeitet. Diese

Bild 8. Zehnspindlige Hartmetallbearbeitungsmaschine Fabrikat Scholz KS 10/10

geschieht auf 10spindligen Spezialbohrmaschinen (Bild 8 und 9) oder in Gruppen zusammengestellten Einzelmaschinen (Bild 10).

Die Bearbeitung des Hartmetalls erfolgt mittels Borkarbid oder Diamantpuder, das in aufgeschlemmter Form zwischen Bohrnadel und Werkstück gebracht wird. Die meist aus Stahl bestehenden Bohrnadeln werden mechanisch auf und ab bewegt und mit einstellbarem Druck gegen das zu bearbeitende Werkstück geführt. Bohrnadel und Werkstück drehen sich bei der Bearbeitung gegenläufig. Diese Bearbeitungsart wird

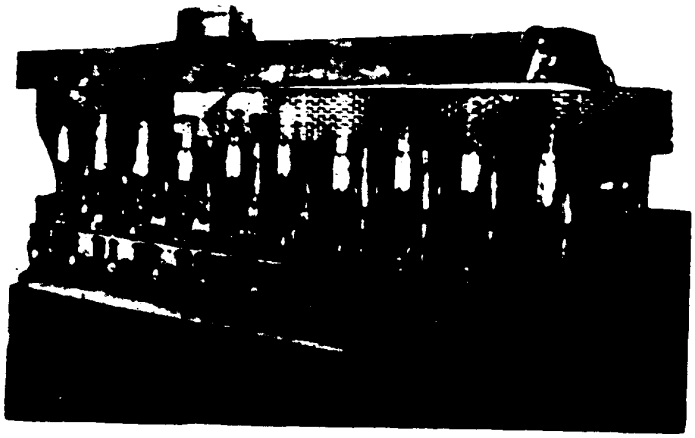


Bild 9. Zehnspindlige Hartmetallbearbeitungsmaschine, Eigenbau

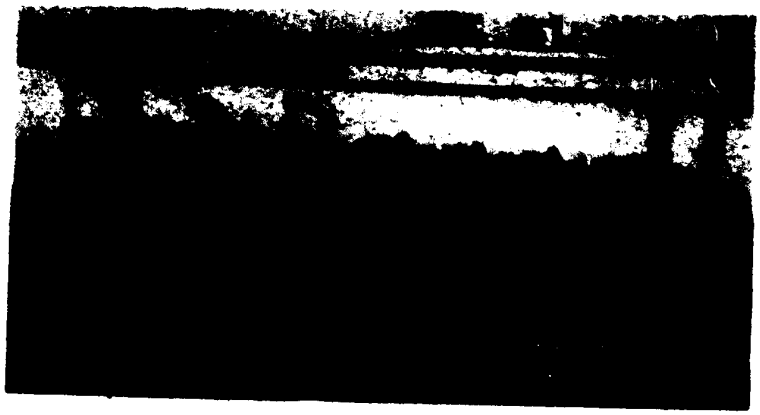


Bild 10. Gruppe von Hartmetallbearbeitungsmaschinen Fabrikat Rehtanz BPM 50 M

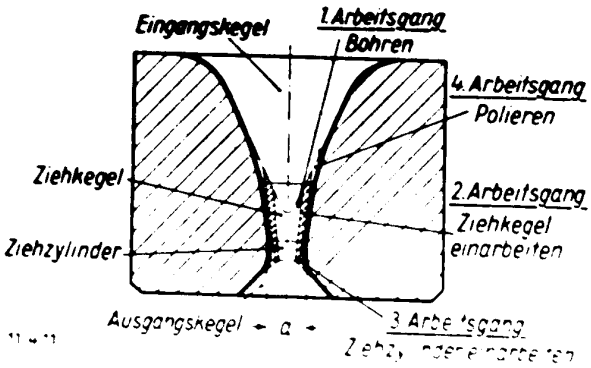


Bild 11. Arbeitsgänge beim Herstellen eines Hartmetallziehsteines

für die Arbeitsgänge „Bohren-", „Ziehkegel-", „Schmierkegel-" und „Ziehzylindereinarbeiten" angewendet (Bild 11).

Das Polieren der so vorgearbeiteten Hartmetallziehsteine erfolgt an Polierböcken von Hand.

Profilierte Ziehsteine werden nach dem gleichen Prinzip bei stillstehenden Spindeln bearbeitet. Die hierfür notwendigen Rohlinge sind jedoch schwierig herzustellen und dadurch sehr teuer.

3.5 Arbeitsablauf bei der funkenerosiven Herstellung eines Hartmetallziehsteines

Als Ausgangsmaterial wird ein beiderseits glatter Rohling, d. h. ohne jede Einpressung, verwendet, da hierbei die Werkzeugelektrodenform am besten bestimmt

Bild 12. Aufspannvorrichtung zur Bearbeitung eines Hartmetallziehsteines

und die Abformgenauigkeit am besten eingehalten werden kann. Der Rohkern wird in das Spannfutter und die Werkzeugelektrode in das Bohrfutter der Spindel eingespannt (Bild 12).

Die Werkzeugelektrode setzt man auf das Werkstück und stellt die einzuarbeitende Tiefe am Tiefenbegrenzer ein. Jetzt wird der Flüssigkeitsbehälter hochgefahren und Arbeitsstromkreis, Steuermotor und Flüssigkeitspumpe werden eingeschaltet. Die Signallampe und das Instrument zeigen die Betriebsbereitschaft der Maschine an. Die Arbeitsspannung wird am Regeltransformator eingestellt und der Kurzschlußstrom durch Einschalten der entsprechenden Vorwiderstände am Stufenschalter festgelegt. Gleichfalls über einen Stufenschalter wird die erforderliche Kapazität eingestellt. Jetzt wird durch Druckknopf die Automatik in Tätigkeit gesetzt, und der Arbeitsprozeß läuft ohne weitere Bedienung, bis die Arbeitsspindel den vorbestimmten Weg durchlaufen hat. Dann schaltet die Automatik ab, und die Arbeitsspindel wird bis zum oberen Totpunkt zurückgeführt. Eine Signallampe zeigt die Abschaltung an. Der soeben geschilderte Arbeitsgang

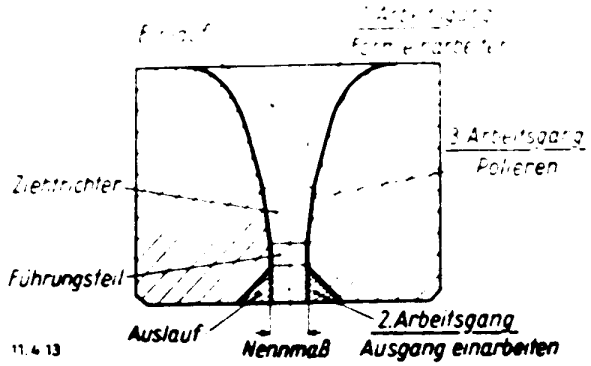


Bild 13. Arbeitsgänge beim funkenerosiven Bearbeiten eines Hartmetallziehsteines

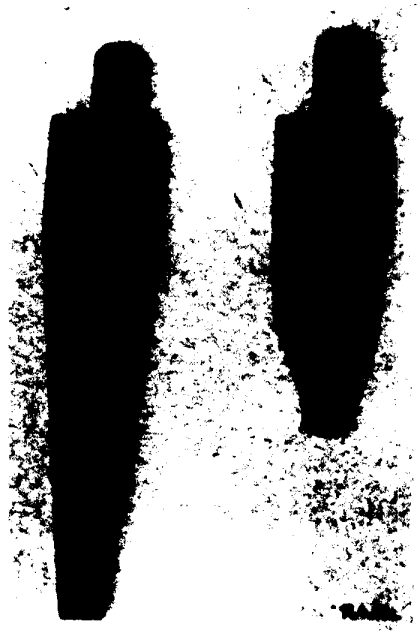


Bild 14. Formelektrode vor und nach dem Bearbeiten von Hartmetall

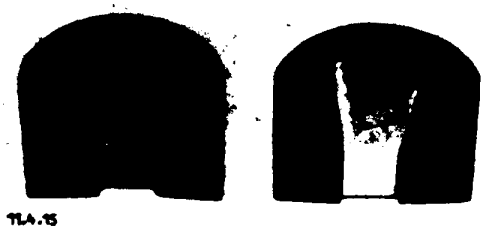


Bild 15. Schnitt eines funkenerosiv bearbeiteten und eines polierten HM-Profilziehsteines

bringt die gewünschte Form in den Rohling ein, so daß nur noch der Auslauf von der anderen Seite mit einer Formelektrode eingearbeitet werden muß (Bild 13)

In Bild 14 ist eine Formelektrode vor und nach Benutzung dargestellt. Man sieht hierbei deutlich die Abnutzung der Elektrode und deren Formveränderung. Im nächsten Bild (Bild 15) ist der mit dieser Elektrode bearbeitete Hartmetallziehstein im Schnitt gezeigt. Ein Teil ist funkenerosiv bearbeitet, der andere Teil mit Diamantpuder poliert worden.

Bild 16. Ziehsteinsatz für ein Sektorprofil 35 mm²

Bild 17. Meßeinrichtung

Die Tätigkeit bei der Bearbeitung von Ziehsteinen, besonders Profilziehsteinen, ist von der Bearbeitungsmaschine weg zur Werkzeugherstellung verlagert worden. Ein laufendes Bedienen der funkenerosiven Maschinen entfällt. Es ist nur ein Einrichten notwendig, so daß gleich der Werkzeugmacher oder der Polierer die Bedienung solcher Anlagen übernehmen wird, es sei denn, die Maschinenanzahl ist so groß, daß das Einrichten allein eine Arbeitskraft beansprucht.

Schwierigkeiten treten beim Ausmessen von Profilen ein, besonders bei jenen, bei denen keine geraden Meßflächen vorhanden sind, wie beispielsweise einem Sektorprofil (Bild 16). Hier wurde eine Behelfseinrichtung geschaffen, die es ermöglicht, das Profil im Verhältnis 10 : 1 mit einer maßstabgerechten Zeichnung optisch zu vergleichen. Zwischen Kondensor und Objektiv einer Multifox IIa wird der zu prüfende Profilziehstein eingelegt und durchleuchtet, nachdem mittels eines Prüfdrahtes das genaue Vergrößerungsverhältnis eingestellt wurde (Bild 17).

3.6 Wirtschaftlichkeit des funkenerosiven Verfahrens

Schon die Gegenüberstellung (Tafel 1) der Bearbeitungszeiten bei runden Hartmetallziehsteinen zeigt die großen Einsparungen des funkenerosiven Verfahrens.

Tafel 1. Gegenüberstellung einiger Bearbeitungszeiten von Hartmetallziehsteinen

Kern d×h mm	Vorbohrung ⌀ mm (Anlief.-Zust.)	Bohrung ⌀ mm (Nenndurchm.)	Reine Maschinen-Laufzeit mechanisch etwa min	Reine Maschinen-Laufzeit elektroerosiv etwa min
9×6	—	1,40	290	6
9×7,5	—	1,40	400	9
17×13	—	2,80	590	9
17×13	2,6	3,80	830	15
22×17	4,1	5,30	450	7
30×24	—	3,50	640	14
30×24	6,1	7,10	1120	5

Zu diesem Zeitgewinn kommen noch die Einsparungen an Bearbeitungsmitteln, wie Borkarbid und Diamantpuder, und die Verringerung der Lagerhaltung von Rohlingen, da von jeder Größe nur eine Ausführung vorhanden sein muß, nämlich die ohne jede Vorpressung.

Als Hauptargument für die Anwendung des elektroerosiven Verfahrens bleibt jedoch die Tatsache, bisher in Hartmetall nicht herstellbare Einarbeitungen vornehmen zu können und dadurch diesem Werkstoff neue Verwendungszwecke zu erschließen.

4. Zusammenfassung

Die elektroerosive Metallbearbeitung ist ein neues Bearbeitungsverfahren, das sich auch bei uns durchzusetzen beginnt. Die Entwicklung von Bearbeitungsmaschinen hat einen Stand erreicht, der die Herstellung in größeren Stückzahlen für die gesamte Industrie als dringend erscheinen läßt, denn erst mit den Maschinen wird auch das Anwendungsgebiet wachsen. Der Bahnbrecher des elektroerosiven

Verfahrens wird zweifellos die hartmetallverarbeitende Industrie sein. Hier werden neben der Einsparung von devisenpflichtigen Diamanten als Bearbeitungsmittel neue Einsatzmöglichkeiten für Hartmetalle entstehen, die zweifellos einen günstigen Einfluß auf das Kostengefüge des Erzeugnisses ausüben.

Diskussion

Es wurde über Oberflächengüten, Ausspülprobleme und Standzeiten der bearbeiteten Werkstoffe diskutiert. Die Erfahrungen haben ergeben, daß auch in der Deutschen Demokratischen Republik Güten von 2 μ wie in Westdeutschland erzielt werden können, weil das nur eine Frage der Elektrodengenauigkeit ist. Hinsichtlich der Standzeiten haben die Erfahrungen unter keinen Umständen eine Verschlechterung ergeben.

11.5 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten der Infrarottechnik

Ing. *W. Schulze*, Berlin

1. Einleitung

Es wurde schon viel über die Verwendung der infraroten Strahlen zur Durchführung von Erwärmungs- und Trocknungsvorgängen in den verschiedensten Industriezweigen gesprochen. Oft ist es durch die Einführung dieses neuen Arbeitsverfahrens möglich gewesen, einen schnellen, kontinuierlichen Arbeitsablauf zu erreichen. Gegenüber den bisherigen Arbeitsmethoden, Erwärmungs- bzw. Trocknungsvorgänge durch Wärmeleitung oder Konvektion zu erreichen, ist der Einsatz von Infrarotanlagen in den letzten Jahren immer mehr in den Vordergrund getreten. Durch die große Betriebssicherheit und Sauberkeit dieser Anlagen, die mit einem sehr hohen Wirkungsgrad arbeiten, ist es möglich, die Infrarotstrahlung überall dort einzusetzen, wo Grenztemperaturen bis etwa 300 bis 350° C gewünscht werden und der zu behandelnde Körper gut die Strahlung absorbiert. Höhere Temperaturen können mit den z. Z. vorhandenen Strahlungsquellen nur schwierig erreicht werden.

2. Wesen der Infrarotstrahlung

Als Infrarotstrahlung bezeichnet man die elektromagnetischen Wellen, die sich im Gesamtspektrum an das sichtbare Gebiet nach der langwelligeren Seite hin anschließen und als Wärmestrahlen wirksam werden. Uns interessieren dabei die Wellenlängen von etwa 0,7 bis 5,0 μ.

Der vom VEB Berliner Glühlampenwerk entwickelte Infrarotstrahler ist eine überbelastete Glühlampe, die einen mit Innenreflektor versehenen, parabolisch ausgebildeten Glaskolben hat. Die Wendeltemperatur ist auf etwa 2200° K eingestellt. Das Wellenlängenmaximum liegt bei etwa 1,3 μ. Die Bezeichnung Hellstrahler rührt daher, daß etwa 3 bis 4 % der Strahlung in den sichtbaren Bereich des Gesamtspektrums fallen.

Der vom VEB Werk für Bauelemente der Nachrichtentechnik „Carl von Ossietzky", Teltow, hergestellte keramische Infrarotdunkelstrahler besteht aus einem Keramikrohr, in das eine Heizspirale eingebettet ist. Seine Oberflächentemperatur beträgt etwa 450 bis 700° C, so daß sein Strahlungsmaximum bei 3 bis 4 μ liegt. Dieser Dunkelstrahler wird mit einem Außenreflektor aus hochglanzpoliertem Aluminiumblech versehen, damit auch bei ihm die Strahlung gerichtet auf das zu bestrahlende Gut fallen kann. Ferner werden derartige Strahler auch von der Firma Martin Gärtner, Dresden, hergestellt. Der zuletzt genannte Betrieb stellt auch den sogenannten Metallrohrstrahler her. Bei diesem Strahler ist die Heizwendel von einem Metallmantel umgeben.

Eine weitere Infrarotstrahlungsquelle ist der gasbeheizte Infrarot-Großflächenstrahler (Bild 1). Bei diesem Strahler ist die innere Blechverkleidung eines Ofens als strahlende Fläche ausgebildet worden, indem das Blech von außen her durch Gasflammen und deren Abgase auf Temperaturen von 300 bis 500° C gebracht wird.

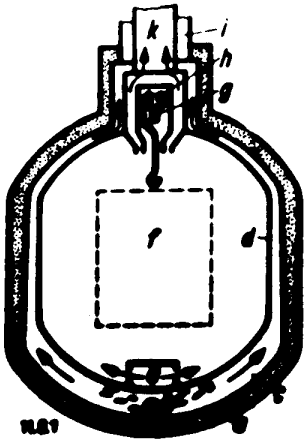


Bild 1. Schnitt durch einen gasbeheizten Großflächenstrahler
a wärmeisolierter Mantel; b Gasbrenner; c Heizraum; d [illegible]
e Spülluftzufuhr; f Gut; g Tragschiene; h Rollenkette; i Abgasabzug; k [illegible]

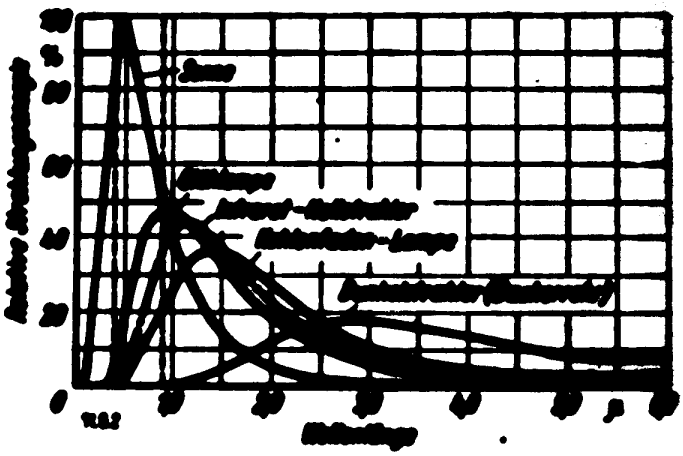


Bild 2. Spektrale Energieverteilung einiger Strahlungsquellen, bezogen auf [illegible] Gesamtstrahlung

Somit können wir jederzeit die gewünschte Wellenlänge einstellen, die den [illegible] sorptionseigenschaften des zu behandelnden Körpers angepaßt ist. Wir haben [illegible] die Möglichkeit, das Infrarotspektrum vom sichtbaren Gebiet bis etwa 5 μ zu [illegible] streichen. Bild 2 zeigt das soeben erwähnte Spektrum und die spektrale Energieverteilung der einzelnen Infrarotstrahlungsquellen.

Ob nun für einen Trocknungsprozeß Hell- oder Dunkelstrahler einzusetzen sind, ist vielfach vom physikalisch-chemischen Verhalten des zu behandelnden Gutes abhängig.

Greifen wir die wohl wichtigste Aufgabe der Infrarottechnik, die Lacktrocknung, heraus. Sie kann mit Hell- und mit Dunkelstrahlern gelöst werden, wobei im allgemeinen der Hellstrahler vorgezogen wird, da die kurzwelligere Hellstrahlung eine

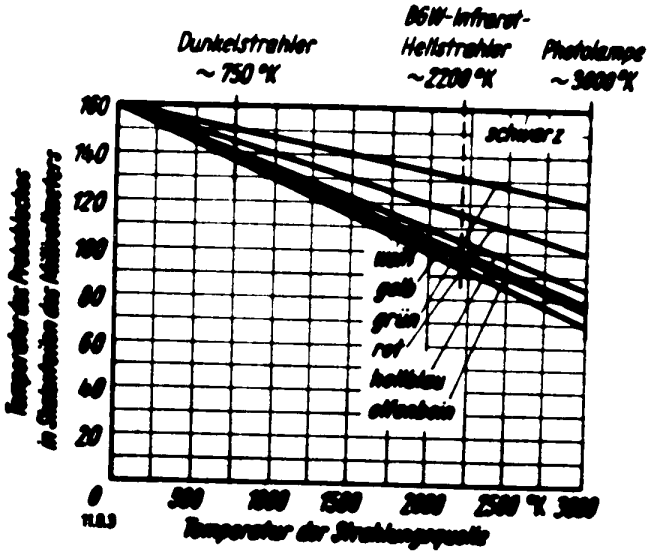


Bild 3. Erwärmung verschiedenfarbiger Bleche im Strahlungsfeld von Hell- und Dunkelstrahlern

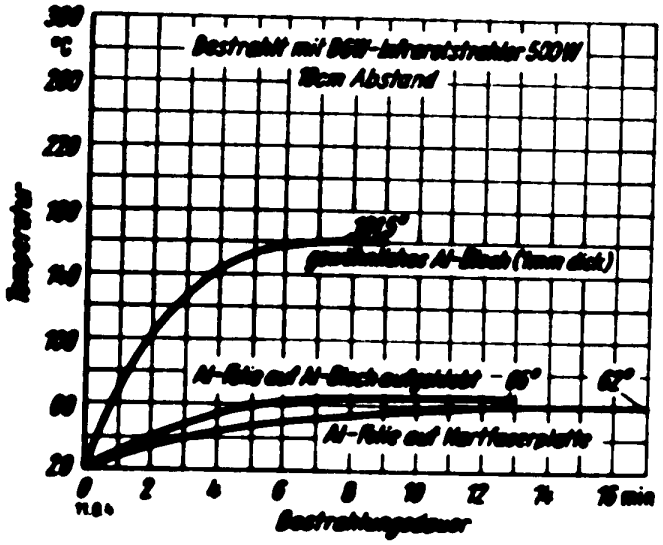


Bild 4. Erwärmung von gewöhnlichem Aluminiumblech und -folie bei gleicher Bestrahlungsstärke

größere Eindringtiefe gegenüber der Dunkelstrahlung besitzt. Ferner benötigt der Hellstrahler keine Anheizzeiten. Er ist sofort nach dem Einschalten betriebsbereit und gestattet es außerdem auf Grund seines 3- bis 4%igen Lichtanteiles, das Gut während des Trocknungsvorgangs genau zu beobachten. Die Vorteile des lang-

welligen Infrarotdunkelstrahlers liegen darin, daß bei der Bestrahlung durch diese der Farbunterschied des Gutes fast ganz verschwindet (s. Bild 3).

Aber auch bei Hellstrahleranlagen können durch sehr gut reflektierende W kleidung diese Unterschiede auf ein Minimum herabgesetzt werden. In Bild 4 die Unterschiede in der Reflexion zwischen gewöhnlichem Aluminiumblech Aluminiumfolie klar zu erkennen. Während das Blech einen erheblichen Teil Strahlung absorbiert und somit auf hohe Temperaturen kommt, reflektiert Folie etwa 95 bis 98 % der auffallenden Strahlung. Diese reflektierte Str wird immer wieder auf das Gut geworfen, so daß die obenerwähnten Farbu schiede nur noch gering sind.

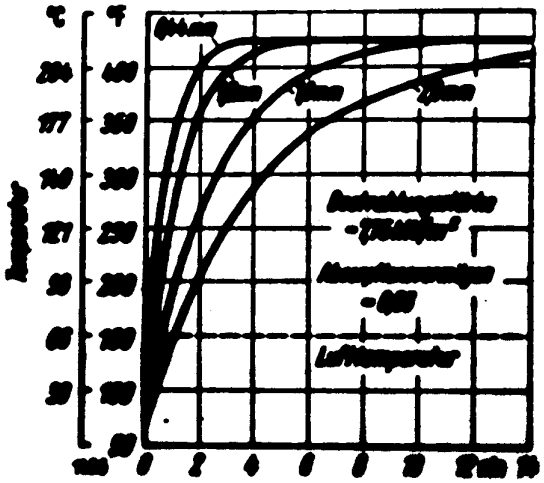


Bild 5. Einfluß der Blechdicke auf die Erwärmung eines Bleches

Von großer Bedeutung für einen schnellen und rationellen T ist die Struktur des Lackträgers, ob matt, blank, mehr oder w rend. Außerdem ist zu beachten, daß Lackschichten auf dickwa längere Trocknungszeiten benötigen als auf Teilen aus dünnw (s. Bild 5).

8. Anwendungsbeispiele

Aus der Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten der Infrarotstrahlung einige herausgegriffen.

Als eine interessante Aufgabe für die Infrarothellstrahlung sei die Erw von Vinidurplatten und -rohren vor der Verformung zu nennen. Durch die Eindringtiefe der kurzwelligen Strahlung ist es möglich, die Vinidurschicht mäßig zu durchwärmen, ohne Überhitzungen an der Oberfläche zu erzielen Bild 6 und 7 ist eine derartige Infrarotanlage, die mit 42 BGW-Hellstrahlern je 250 W ausgerüstet ist, zu sehen.

Bei der Trocknung von Lacken wollen wir nun von einem besonders einfach Körper ausgehen. Das Dynamoblech stellt einen derartigen einfachen Körper d Diese Aufgabe kann mit Hell- und Dunkelstrahlern gleich gut gelöst werden, d

es sich hierbei um ein sehr dünnes, gut absorbierendes Blech handelt, das mit einem Klarlack überzogen ist. Bild 8 zeigt die Gesamtansicht einer Hellstrahleranlage, durch die das Dynamoblech in 2 bis 3 min durchgegeben und getrocknet

Bild 6. ***Infrarotanlage zum Erwärmen von Vinidurrohren vor der Verformung (Gesamtansicht)***

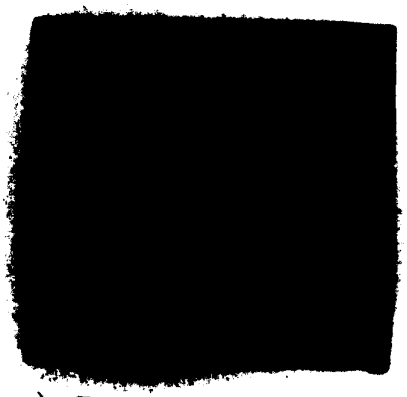


Bild 7. ***Infrarotanlage zum Erwärmen von Vinidurrohren vor der Verformung (Blick in die Strahlungskammer)***

Bild 8. *Infrarottunnelofen zum Einbrennen der Lackierung von Dynamoblechen (Gesamtansicht)*

Gesamtlänge 12 225 mm, Höhe 1800 mm, Breite 1630 mm, Strahlungstunnellänge 6645 mm, **Kühltunnellänge** 2855 mm, Bandbreite 1000 mm, 356 BGW-IR-Strahler (250 W), 96,5 kW **Leistung**, Bestrahlungsdauer 2 min

wird. In Bild 9 wird ein Ausschnitt eines Strahlungsfeldes gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, daß der Strahler nur mit seiner Kuppe in den Ofenraum hineinragt, während die Rückseite des Strahlers mit Spiegel und Fassung außerhalb liegt. Dieser Aufbau ist erforderlich, da diese Teile nicht überhitzt werden dürfen. Durch gute Luftführung können so diese Teile gut gekühlt und eine Aussockelung vermieden werden. Die auf diese Weise vorgewärmte Luft kann nun in den Ofenraum geleitet werden und so dem Trocknungsprozeß als Konvektionswärme zugute kommen.

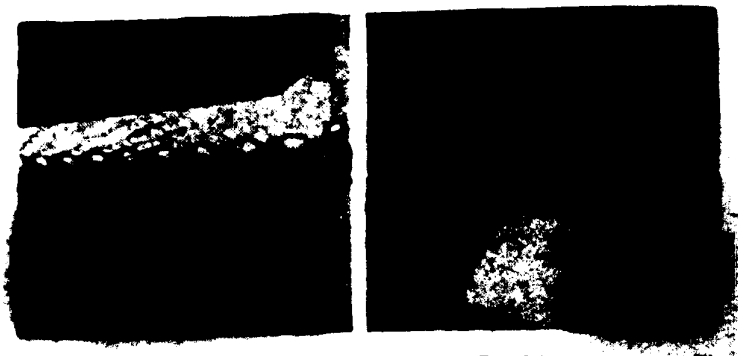


Bild 9. Infrarottunnelofen zum Einbrennen der Lackierung von Dynamo
a Blick in den Trockenkanal; b Dynamoblechabnahme

Eine schon etwas schwierigere Aufgabe besteht darin, dreidimensionale [illegible] zu trocknen. Aber durch die gute Richtmöglichkeit der Strahlung [illegible] in der Hand, den Strahlungsofen der Gestalt des Gutes anzupassen.

Die in Bild 10 gezeigte Hellstrahleranlage dient zum Einbrennen von Farblacken auf Instrumententeilen. Diese Anlage ist vom VEB [illegible] Special, Radebeul, gebaut worden.

Bild 10. Infrarotanlage zum Einbrennen von Farblacken auf Instrumententeilen (Blick in den Strahlungstunnel)

Die Trocknung von Lacken auf Metallteilen muß in zwei Zeitabschnitte eingeteilt werden. Zunächst wird der Körper auf die Trocknungs- bzw. Einbrenntemperatur gebracht, dann muß diese Temperatur so lange gehalten werden, bis die Aushärtung erfolgt ist. Die hierfür benötigten Zeiten müssen durch Vorversuche ermittelt werden.

Wie läßt sich diese Temperaturregelung in einer Infrarotanlage erreichen? Bild 11 zeigt deutlich, daß durch stärkere Dosierung der Strahlung am Ofeneinlauf, indem man dort die doppelte Anzahl Strahler anbringt bzw. anstatt der üblichen 250-W-Strahler solche von 500 W Leistung einbaut, eine Verkürzung der Hochheizzeit von nahezu 75 % erreicht werden kann. Das bedeutet eine Verkürzung der Baulänge der gesamten Anlage.

In der zuletzt erwähnten Anlage wurde diese Möglichkeit berücksichtigt, da damit zu rechnen ist, daß auch einmal dickwandigere Körper behandelt werden sollen. Die Installation am Ofeneinlauf wurde so ausgelegt, daß jeder 250-W-Strahler gegen einen 500-W-Strahler ausgewechselt werden kann.

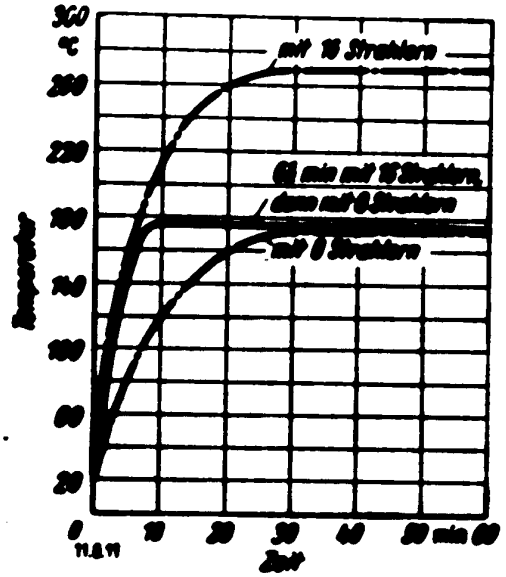


Bild 11. Gesteuerte Erwärmungskurve für ein 4,45 mm dickes geschwärztes Eisenblech

Kam es bei den soeben erwähnten Beispielen darauf an, erst die Temperatur hochzujagen, so zeigt uns das nächste Beispiel den entgegengesetzten Verlauf der Oberflächenbehandlung. Es soll ein Kräuselack auf Büromaschinenteilen eingebrannt werden. Hierbei ist es erforderlich, erst den Lack bei einer niedrigen Temperatur zu entwickeln und ihn nachher, ohne den Arbeitsfluß zu unterbrechen, mit hoher Temperatur einzubrennen. Das kann in einer Großanlage mit 32 m Tunnellänge wirtschaftlich in Fließfertigung erfolgen. Das gespritzte Gut wird im Spritzraum direkt auf das Fließband gelegt und läuft durch eine kleine Öffnung in der Wand in den im Nebenraum stehenden Trockenofen. Diese Anlage ist vom VEB Konstruktion und Entwicklung, Abteilung Infrarot, Berlin, entwickelt worden (Bild 12).

Da an diese Infrarotanlagen gleich eine Kühlzone angebaut ist, kann das vor wenigen Minuten erst gespritzte Gut sofort vom Band abgenommen und zur Fertigmontage oder Verpackung weitergeleitet werden.

Eine weitere interessante Aufgabe besteht darin, zylindrische Körper durch Infrarotbestrahlung zu behandeln. Ein schönes Beispiel bietet die Trockenanlage für die Spachtel- und Lacktrocknung an Badeofenmänteln. Hier wird der Körper

von zwei senkrechten Strahlerwänden bestrahlt, während er sich durch die A[illegible] lage bewegt und dabei langsam um seine Achse dreht. Somit erreichen wir a[illegible] hier eine allseitige und gleichmäßige Bestrahlung. Es ist hierbei zu beachten, [illegible] die unteren Strahlerreihen mit stärkeren Strahlern ausgerüstet sein müssen.

Bild 12. Infrarotanlage zur [illegible] und [illegible] auf [illegible]

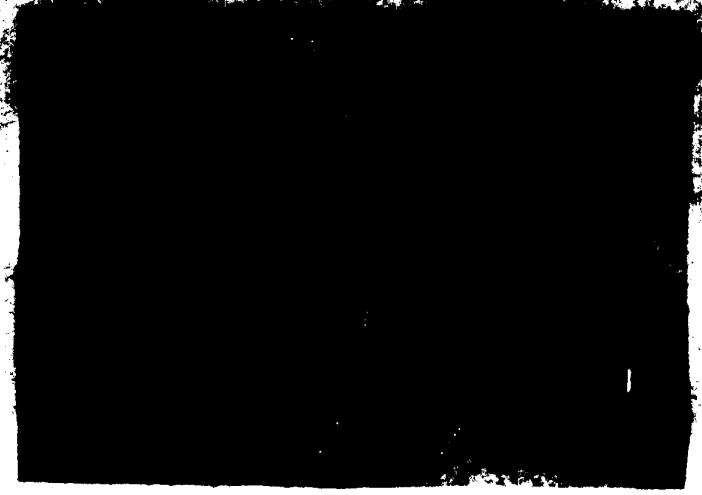


Bild 13. Infrarotanlage zur Trocknung der Lackierung von Badeofenmä[illegible] (Gesamtansicht)

sonst durch die aufsteigende Konvektionswärme Temperaturunterschiede an d[illegible] Badeofenmänteln auftreten, die zu ungleichmäßigen Aushärtungen des Ku[illegible] harzlackes führen können. Bild 13 zeigt die Gesamtansicht dieser Anlage.

4. Anwendung der Infrarottrocknung in der Automobilindustrie

Auf der Leipziger Herbstmesse 1954 wurde die erste mit Infrarothellstrahlern ausgerüstete Autokammer der Deutschen Demokratischen Republik ausgestellt

(s. Bild 14). Diese Anlage stellt die Infrarottechnik aber noch vor große Probleme. Eine große Schwierigkeit liegt bei der genannten Aufgabe in den unterschiedlichen Schichtdicken der bestrahlten Karosserie, wo Übergänge von etwa 1 mm dicken Blechen zu dicken Verstrebungen vorhanden sind. Um diese unterschiedlichen Massen gleichmäßig hochheizen zu können, benötigt man eine längere Bestrahlungszeit. Ferner muß hier eine gewisse Luftumspülung vorgesehen werden. Zeit ist aber kostbar, da ja elektrische Energie sehr teuer ist. Folglich mußte ein anderer Weg eingeschlagen werden, um diese Übelstände zu beseitigen. Sowohl die Grundierung als auch der Lack hatten anfangs eine nur geringe Einbrenn- bzw. Aushärtetemperaturtoleranz. Da aber die dünnen Bleche sehr schnell auf hohe Tem-

[illegible] Kammerofen zur Trocknung der Lackierung von Kraftwagenkarosserien (Blick in die Kammer)

[illegible] können, während die dickwandigen Teile träge hinterherfolgen, besteht [illegible] Gefahr, daß einzelne Stellen ausgehärtet werden, andere dagegen zurückbleiben. [illegible] Auf Grund guter Zusammenarbeit mit den Lackfabriken ist es jetzt gelungen, Lacke zu entwickeln, die eine größere Temperaturtoleranz aufweisen. Mit diesen Lacken ist es nun möglich, eine gute Oberflächenbehandlung durchzuführen. Hierbei sei gleich noch erwähnt, daß der Aufbau eines Kammerofens viel mehr Schwierigkeiten mit sich bringt als ein Durchlaufofen. Ist ersterer so gebaut, daß die Strahler durch stärkere oder schwächere ersetzt werden können, besteht immer die Möglichkeit, etwas in der Temperatur voreilende Teile durch schwächere Bestrahlung aufzuhalten bzw. die Bestrahlungsintensität an anderen Stellen zu erhöhen.

Die Aufgabenstellung, Anker nach dem Tränken mittels Infrarotbestrahlung zu trocknen, wurde anfangs als wenig aussichtsreich abgelehnt, da es nicht möglich ist, durch Holz-, Eisen- oder Kupferteile hindurchzustrahlen und so den im Innern der Ankernut sitzenden Tränklack zu trocknen. Die Versuche wurden aber dennoch bei der BVG, Berlin, unternommen und ein derartiger Ankertrockner von der IKA entwickelt, der mit 42 Infrarothellstrahlern ausgerüstet ist. Die sieben Strahlerreihen sind annähernd der Form des Ankers angepaßt (s. Bild 15).

Wie erfolgt nun die Trocknung des Tranklackes? Infolge der guten Wärmeleitfähigkeit der Ankerbleche wird das anfangs außen erhitzte Blechpaket schnell auch in der Tiefe auf Temperatur gebracht. Dadurch erfolgt nun eine Erwärmung der Nut von allen Seiten. Der besondere Vorteil der infrarot getrockneten Anker liegt darin, daß bei diesem Verfahren der Trockenprozeß wesentlich beschleunigt werden kann.

Diese Anlagen konnten bisher mit gutem Erfolg bei der Reparatur von Bahnmotorenankern bis etwa 60 kW eingesetzt werden. Ob die gleichen Vorteile auch bei größeren Ankern erreicht werden, ist noch zu klären, da es sich hierbei um sehr große Massen handelt, die hochgeheizt werden müssen und dadurch die Gefahr besteht, daß der Lack an der Oberfläche vortrocknet.

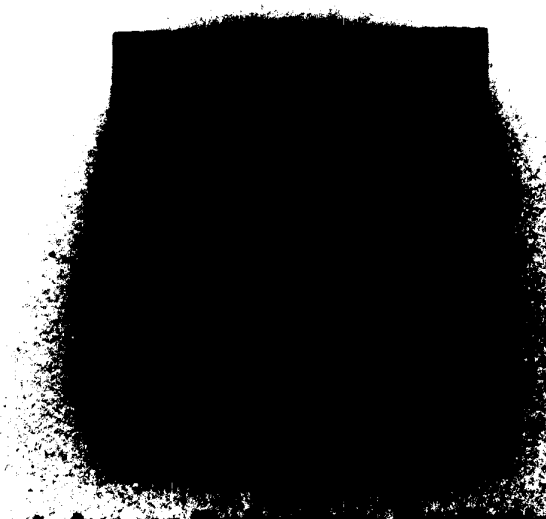


Bild 15. Infrarotanlage zur [illegible]

Diese wenigen Beispiele über den Einsatz von Infrarotstrahlern [illegible] und Ausbärten der Lacke werden genügen, um die vielseitigen [illegible] Möglichkeiten zu zeigen.

Ein sehr wichtiger Teil in der Fugtexmaschinenindustrie ist [illegible] sich. Da es sich bei der Fixierung des Perlongewebes um die [illegible] ringer Temperaturgrenzen (± 2° C) handelt, war es sehr schwierig, [illegible] rotestrahlung allein zu arbeiten. Für diese Spezialaufgabe kommt [illegible] wieder die Dunkelstrahlung in Betracht, da Perlon viel besser die [illegible] Infrarotestrahlung absorbiert, dagegen die Hellstrahlung durchläßt. W[illegible] den bisher üblichen Methoden zur Perlonfixierung, dem Kontakt- bzw. K[illegible] tionsverfahren, eine schnelle Abkühlung des Perlongewebes erforderlich ist, [illegible] bei der Anwendung der Infrarotestrahlung der normale Temperaturausgleich [illegible] Übergang aus dem Strahlungsbereich in die Raumluft.

Erwähnt sei, daß bei der Dampffixierung 20 bis 30 min bei einer Temperatur von 125 bis 130° C das Gewebe gedämpft werden muß. Demgegenüber benötigt die Fixierung mit Infrarotbestrahlung nur 10 bis 15 s bei einer Temperatur von 190° C.

Ferner konnten bei den bisher üblichen Verfahren die auftretenden Spannungen im Perlongewebe nicht vermieden werden. Diese Spannungen führten dazu, daß

das Gewebe ungleichmäßige Maschenbilder und gewellte Oberflächen aufwies. Auch dieser Übelstand konnte durch die Strahlungsfixierung überwunden werden.

Obwohl schon vor längerer Zeit in Westdeutschland und im Ausland in dieser Richtung durchgeführte Versuche gescheitert sein sollen, ist es den Kollegen *Wärker* und *Heinrich* vom VEB Textilveredelungswerk Reichenbach gelungen, diese schwierige Aufgabe zu lösen, so daß jetzt in der Deutschen Demokratischen Republik mit dem Serienbau von Infrarot-Fixieranlagen begonnen werden konnte.

Wie ist eine solche Anlage aufgebaut? Durch den Einbau einer einwandfreien automatischen Temperaturregelung ist es möglich, die knapp gehaltene Toleranz einzuhalten. Bild 16 zeigt das Schema einer derartigen Anlage. Das Gewebe läuft nach dem Imprägnieren über einen Breitstreckrahmen zuerst durch die Trockenzone, die bei 160° C das Gewebe trocknet, erreicht danach die Vorkondensationszone, die auf 160 bis 180° C eingestellt werden kann, und gelangt dann in die Fixierzone, die jetzt bei 190° C mit einer Toleranz von ± 2° C Gewebetemperatur arbeiten muß. Der Fixierzone schließt sich ein kurzer Kühlkanal an, der nur die Raum-

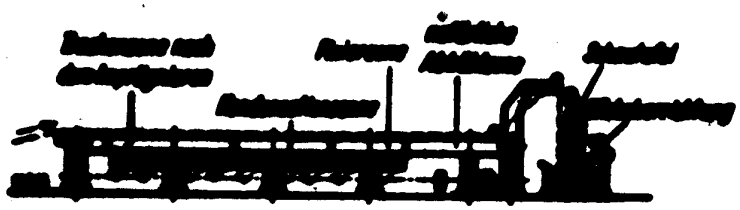


Bild 16. Ausschnitt aus der kontinuierlichen Fertigungsstraße zum Fixieren von Perlengeweben und -zieben (System Wärker und Heinrich)

temperatur aufweist. Das Gewebe kann dann gleich zur Kontrolle über eine Schauwand laufen und von der Wickelvorrichtung aufgenommen werden.

4. Vorteile und Grenzen des Infrarotverfahrens

Aus den oben angeführten Beispielen geht hervor, daß die Infraroterwärmung und -trocknung große Vorteile gegenüber der bisher üblichen Konvektions- und Kontakttrocknung mit sich bringt. Die Betriebssicherheit und Sauberkeit der Infrarotanlagen dürften ein wichtiger Punkt sein. Dazu kommt, daß speziell die Hellstrahleranlagen trägheitslos arbeiten, also nach jeder Pause oder Betriebsstörung sofort wieder betriebsbereit sind und keine Anheizzeiten benötigen. Aber auch die Dunkelstrahleranlagen haben bedeutend geringere Anheizzeiten als die bisherigen Konvektionsöfen. Durch die gute Richtmöglichkeit der Strahlung kann der Infrarotstrahlungsofen auch sehr gut der Gestalt des zu behandelnden Körpers angepaßt werden. Ferner führt die Möglichkeit einer schnellen Steuerung der Bestrahlungsintensität zu großen Leistungssteigerungen. Die Vorteile der schnellen Aufheizung von Körpern sowie Trocknung bzw. Einbrennung von Lacken bringt einen weiteren Vorteil mit sich, der sich in einer einwandfreien Oberfläche widerspiegelt, da sich in der kurzen Zeit keine Staubteile absetzen können. Ein weiterer Vorteil liegt darin, daß die Infrarotanlagen einen geringeren Platzbedarf aufweisen. Ferner ist mit Ausnahme der gasbeheizten Anlagen keine besondere Wärmeisolation nötig.

Aber nicht für alle Trocknungsprozesse können elektrisch beheizte Infrarot-anlagen wirtschaftlich eingesetzt werden. So wird der Einsatz von elektrischer Energie zum Aufheizen von massigen Körpern, wie bereits gesagt, zu teuer. Ferner ist es nicht immer möglich, Schattenbildungen bei komplizierten Körpern zu vermeiden, um dann eine gleichmäßige Bestrahlung zu erreichen. Diese Schwächen lassen sich aber zum Teil durch Kombinationen mit anderen Verfahren überwinden. So wird die Kombination der Infrarotstrahlung mit Konvektion (Warmluftumwälzung) dort eingesetzt, wo Temperaturunterschiede an komplizierten Körpern ausgeglichen werden müssen.

Um aber auch dickwandige Körper schnell hochzuheizen und zu trocknen, steht die Möglichkeit einer Kombination der Hochfrequenzheizung mit der Infrarotstrahlung.

Zum Trocknen von ölhaltigen Lacken und Farben, bei denen eine Oxy[illegible] durch den Luftsauerstoff erfolgt, kann die Kombination der Infrarot- und [illegible]violettstrahlung angewandt werden.

Die angeführten Beispiele geben nur einen geringen Einblick in die vi[illegible] Anwendungsmöglichkeiten der Infrarotstrahlung. Sie zeigen sehr deu[illegible] bei richtigem Einsatz große Vorteile aufzuweisen sind. Es ist aber noch vi[illegible] nötig, um das umfangreiche Aufgabengebiet der Infrarottechnik voll a[illegible] zu können. Wir dürfen aber hoffen, daß uns auch weiterhin die gute [illegible]arbeit zwischen Betrieben und Laboratorien zu weiteren Erfolgen fü[illegible]

Literatur

Borchert-Jubitz: Infrarottechnik. 2. erweiterte Auflage. Verlag Tech[illegible] 1954, 197 S., 140 Bilder, 4 Tabellen.

Wärker, E., Heinrich, O.: Perspektiven der Infrarotanwendung in d[illegible] industrie. Textil- und Faserstofftechnik, 4. Jg. (1954) H. 12.